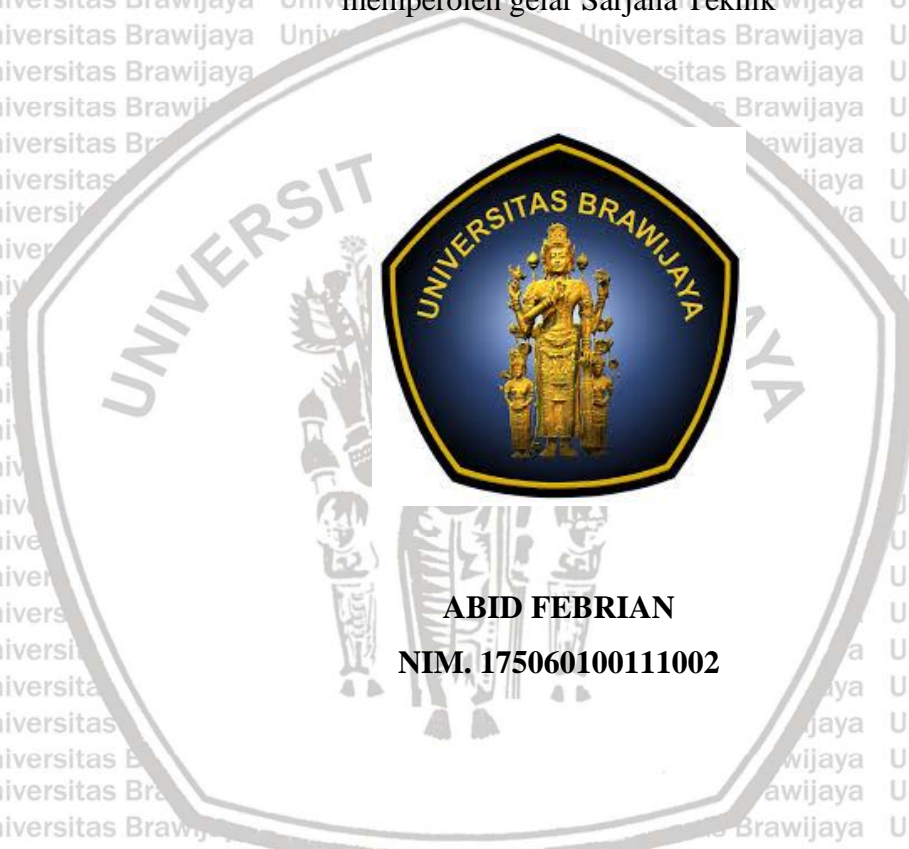


**PENGARUH INTRUSI AIR PADA BETON NORMAL TERHADAP  
GELOMBANG *ECHO* DENGAN MENGGUNAKAN METODE  
UPE (*ULTRASONIC PULSE ECHO*)**

**SKRIPSI  
TEKNIK SIPIL**

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik



**ABID FEBRIAN  
NIM. 175060100111002**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA  
FAKULTAS TEKNIK  
MALANG**

**2021**





## LEMBAR PENGESAHAN

### PENGARUH INTRUSI AIR PADA BETON NORMAL TERHADAP GELOMBANG *ECHO* DENGAN MENGGUNAKAN METODE UPE (*ULTRASONIC PULSE ECHO*)

#### SKRIPSI TEKNIK SIPIL

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik



**ABID FEBRIAN**

**NIM. 175060100111002**

Skrripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing  
pada tanggal 4 Agustus 2021

Dosen Pembimbing I

**Dr. Eng. Ir. Indradi W., ST., M.Eng. (Prac.)**  
NIP. 19810220 200604 1 002

Dosen Pembimbing II

**Dr. Eng. Ir. Ming Narto W., ST., MT., M.Sc.**  
NIP. 201102 840705 1 001



Mengetahui,  
Ketua Program Studi S1

**Dr. Eng. Ir. Indradi W., ST., M.Eng. (Prac.)**  
NIP. 19810220 200604 1 002





## HALAMAN IDENTITAS TIM PENGUJI SKRIPSI

### JUDUL SKRIPSI:

Pengaruh Intrusi Air pada Beton Normal terhadap Gelombang *Echo* dengan Menggunakan Metode UPE (*Ultrasonic Pulse Echo*)

Nama Mahasiswa : Abid Febrian  
NIM : 175060100111002

Program Studi : Teknik Sipil  
Minat : Struktur

### TIM DOSEN PENGUJI

Dosen Penguji I : Dr. Eng. Ir. Indradi Wijatmiko, ST., M.Eng. (Pract)

Dosen Penguji II : Dr. Eng. Ir. Ming Narto W, ST., MT., M.Sc.

Dosen Penguji III : Ir. Ari Wibowo, ST., MT., Ph.D

Tanggal Ujian : 29 Juli 2021

SK Penguji : 1288/UN10.F07/KP/2021





## PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya, tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70)

Malang, 4 Agustus 2021

Abid Febrian

NIM. 175060100111002

UNIVERSITAS BRAWIJAYA







## RIWAYAT HIDUP

Abid Febrian. Lahir di Madiun, 6 Februari 2000. Anak pertama dari Bapak Anas Rifa'i dan Ibu Dewi Aminah. Mulai memasuki bangku sekolah di SDN Ciangsana 02 Bogor sejak tahun 2006 dan pindah sekolah pada tahun 2010 ke SDN Nglandung 2 Madiun sampai lulus pada tahun 2012. Kemudian melanjutkan pendidikan di MTsN Kembang Sawit Madiun dan lulus pada tahun 2015. Selanjutnya mengenyam pendidikan di MAN 2 Madiun dan lulus pada tahun 2017. Kemudian melanjutkan ke jenjang pendidikan tinggi di bangku perkuliahan hingga lulus S1 (Strata 1) pada tahun 2021 dari Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Malang.

Selama kuliah, penulis aktif berpartisipasi dalam kegiatan organisasi di kampus. Adapun organisasi yang pernah diikuti adalah Himpunan Mahasiswa Sipil dari tahun 2018 hingga tahun 2021 (3 periode) dan Forum Studi Islam Sipil dari tahun 2018 sampai tahun 2019 (2 periode). Kepanitiaan yang pernah diikuti penulis berupa kepanitiaan Kuliah Tamu, PROBINMABA 2018 dan 2019, Civil Camp 2019, Temu Angkatan 2018, Asia Bridge Competition 2019 dan Civil Fiesta 2019. Selain itu penulis pernah menjadi Asisten Analisis Struktur I, Perpetaan dan Asisten Laboratorium.

Malang, 3 Agustus 2021

Penulis





1. Kedua orang tua yang selalu memberikan semangat, doa serta dukungan.
2. Bapak Dr. Eng. Ir. Alwafi Pujiraharjo, ST., MT., selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
3. Ibu Dr. Eng. Eva Arifi ST., MT., selaku Sekretaris Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
4. Bapak Dr. Eng. Ir. Indradi Wijatmiko, ST., M.Eng (Prac), selaku Ketua Program Studi Sarjana (S1) Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya dan Dosen Pembimbing 1.
5. Bapak Dr. Eng. Ir. Ming Narto Wijaya, ST, MT, M.Sc., selaku Kepala Laboratorium Struktur dan Bahan Bangunan serta Dosen Pembimbing 2.
6. Bapak Ir. Ari Wibowo, ST., MT., Ph.D., selaku Ketua Majelis.
7. Ibu Ir. Christin Remayanti N, ST., MT., selaku Dosen Pembimbing.
8. Bapak Dr. Ir. Wisnumurti, MT., selaku KKJF Struktur.
9. Bapak Dr. Eng. Achfas Zacob, ST., MT., selaku Dosen Penasihat Akademik.
10. Bapak Sugeng, Bapak Dino, Bapak Hadi selaku Laboran Laboratorium Struktur.
11. Rekan dan sahabat sesama penelitian dan tugas akhir (Aldi, Candra, Naufal, Tisya dan Nungki) yang telah berjuang bersama.
12. Keluarga Besar Mahasiswa Sipil FT-UB dan seluruh mahasiswa angkatan 2017 jurusan Teknik Sipil yang telah membantu dan memberikan semangat serta doa dalam menyelesaikan skripsi ini.
13. Semua pihak yang telah membantu memberikan dukungan yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini jauh dari kesempurnaan, oleh karena itu segala kritik dan saran yang bersifat membangun sangat diharapkan demi kesempurnaan skripsi ini.

Akhir kata, penulis berharap agar nantinya hasil yang telah didapatkan pada skripsi ini dapat bermanfaat untuk para pembaca baik sebagai referensi ataupun bahan bacaan ilmiah.

Malang, 19 Juli 2021

Penulis





## DAFTAR ISI

<b>KATA PENGANTAR .....</b>	<b>i</b>
<b>DAFTAR ISI .....</b>	<b>iii</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>vii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR .....</b>	<b>ix</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN .....</b>	<b>xi</b>
<b>RINGKASAN .....</b>	<b>xiii</b>
<b>SUMMARY .....</b>	<b>xv</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Identifikasi Masalah .....	2
1.3 Rumusan Masalah .....	2
1.4 Batasan Masalah .....	3
1.5 Tujuan .....	3
1.6 Manfaat .....	3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>5</b>
2.1 Beton .....	5
2.1.1 Semen .....	5
2.1.2 Agregat Kasar .....	6
2.1.3 Agregat Halus .....	6
2.1.4 Air .....	7
2.2 Perawatan Pada Beton ( <i>Curing</i> ) .....	7
2.3 Pengujian Pada Beton .....	7
2.3.1 <i>Destructive Test</i> .....	8
2.3.2 <i>Non Destructive Test</i> .....	8
2.4 Pengujian Kuat Tekan dengan Metode Rebound Hammer Test .....	9
2.5 <i>Ultrasonic Pulse Echo (UPE)</i> .....	10
2.5.1 Prinsip <i>Ultrasonic Pulse Echo (UPE)</i> .....	10
2.5.2 Metode Pengujian <i>Ultrasonic Pulse Echo (UPE)</i> .....	11
2.5.2.1 A-Scan .....	11
2.5.2.2 B-Scan .....	12
2.6 Gelombang Mekanik .....	12
2.7 Impedansi Akustik .....	15

2.8 Intrusi Air Pada Beton .....	16
2.9 Hubungan Intrusi Air dengan Cepat Rambat Gelombang Echo .....	16
2.10 Penelitian Terdahulu .....	17
<b>BAB III METODE PENELITIAN .....</b>	<b>19</b>
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian .....	19
3.2 Peralatan dan Bahan Penelitian .....	19
3.2.1 Peralatan Penelitian .....	19
3.2.2 Bahan Penelitian .....	19
3.3 Variabel Penelitian .....	20
3.4 Analisis Bahan .....	20
3.4.1 Semen .....	20
3.4.2 Agregat Kasar .....	20
3.4.3 Agregat Halus .....	20
3.4.4 Air .....	20
3.5 Tahapan Penelitian .....	21
3.6 Rancangan Penelitian .....	22
3.7 Prosedur Penelitian .....	25
3.7.1 Pengujian Bahan Dasar ( <i>Mix Design</i> ) .....	25
3.7.2 Pengujian Beton Segar ( <i>Fresh Concrete</i> ) .....	25
3.7.3 Pembuatan Benda Uji .....	25
3.7.4 Perawatan Benda Uji .....	26
3.7.5 Pengujian Kuat Tekan .....	26
3.7.6 Pengujian <i>Ultrasonic Pulse Echo</i> (UPE) .....	27
3.8 Metode Analisis .....	29
3.8.1 Pengumpulan Data .....	29
3.8.2 Pengolahan Data .....	30
3.9 Hipotesis .....	32
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>33</b>
4.1 Pembuatan Benda Uji .....	33
4.1.1 Perencanaan Pembuatan Benda Uji .....	33
4.1.2 Proses Pembuatan Benda Uji .....	33
4.1.3 Proses <i>Curing</i> .....	35
4.2 Pengujian Kuat Tekan Menggunakan <i>Compression Test Machine</i> .....	36
4.2.1 Beton Normal .....	37



4.2.2 Beton dengan Lubang Arah Transversal .....	37
4.2.3 Beton dengan Lubang Arah Longitudinal .....	39
4.3 Pengujian Kuat Tekan Menggunakan Hammer Test .....	40
4.4 Pengujian <i>Ultrasonic Pulse Echo</i> (UPE) .....	41
4.5 Analisis Impedansi Akustik .....	42
4.6 Hasil Pengujian UPE dengan Metode B – Scan .....	44
4.6.1 Beton Normal .....	45
4.6.2 Beton dengan Lubang Arah Transversal dan Longitudinal .....	46
4.6.2.1 Hasil <i>Scanning</i> (Pemindaian) Lubang Tanpa Air dan Berisi Air .....	46
4.6.2.2 <i>Waveform</i> (Bentuk Gelombang) Lubang Tanpa Air dan Berisi Air .....	50
4.6.2.3 <i>Velocity</i> (Cepat Rambat) Lubang Tanpa Air dan Berisi Air .....	54
4.7 Hasil Pengujian UPE dengan Metode A – Scan .....	56
4.7.1 Beton Normal .....	57
4.7.2 Beton dengan Lubang Arah Transversal dan Longitudinal .....	58
4.7.2.1 Hasil <i>Scanning</i> (Pemindaian) Lubang Tanpa Air dan Berisi Air .....	58
4.7.2.2 <i>Waveform</i> (Bentuk Gelombang) Lubang Tanpa Air dan Berisi Air .....	62
<b>BAB V PENUTUP .....</b>	<b>71</b>
5.1 Kesimpulan .....	71
5.2 Saran .....	72
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>73</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>75</b>

(Halaman sengaja dikosongkan)





## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Cepat rambat impedansi akustik di beberapa material .....	15
Tabel 2.2 Daftar penelitian terdahulu .....	17
Tabel 3.1 Rancangan benda uji .....	22
Tabel 3.2 Hasil Pembacaan A scan/ B scan pada beton .....	31
Tabel 3.3 <i>Waveform</i> hasil B scan .....	31
Tabel 3.4 <i>Waveform</i> hasil A scan .....	31
Tabel 3.5 Hasil rekapitulasi cepat rambat B scan .....	31
Tabel 3.6 Hasil rekapitulasi data t1 dan A1 untuk waveform .....	32
Tabel 4.1 Kebutuhan material untuk pembuatan benda uji .....	33
Tabel 4.2 Hasil nilai slump pada pembuatan benda uji .....	34
Tabel 4.3 Hasil pengujian kuat tekan silinder beton normal .....	37
Tabel 4.4 Hasil pengujian kuat tekan silinder beton dengan lubang arah transversal .....	38
Tabel 4.5 Hasil pengujian kuat tekan silinder beton dengan lubang arah longitudinal .....	39
Tabel 4.6 Hasil pengujian kuat tekan beton dengan metode <i>Hammer Test</i> .....	41
Tabel 4.7 Impedansi akustik pada material .....	43
Tabel 4.8 Hasil B – scan beton normal .....	46
Tabel 4.9 Hasil pemindaian b-scan beton dengan lubang tanpa air dan berisi air .....	47
Tabel 4.10 Bentuk gelombang b-scan beton dengan lubang tanpa air dan berisi air .....	51
Tabel 4.11 Hasil <i>velocity</i> (cepat rambat) pengujian UPE metode b-scan .....	55
Tabel 4.12 Hasil A – scan beton normal. ....	58
Tabel 4.13 Hasil pemindaian a-scan beton dengan lubang tanpa air dan berisi air .....	59
Tabel 4.14 Contoh <i>waveform</i> a-scan beton dengan lubang tanpa air dan berisi air .....	63
Tabel 4.15 Rekapitulasi data t1 dan A1 <i>waveform</i> beton dengan lubang arah transversal .....	65
Tabel 4.16 Rekapitulasi data t1 dan A1 <i>waveform</i> beton dengan lubang arah longitudinal .....	66
Tabel 4.17 Rekapitulasi persentase perubahan waktu t1 pada beton area lubang .....	67

(Halaman sengaja dikosongkan)





## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Bagian-bagian dan prinsip kerja alat uji hammer test .....	9
Gambar 2.2 Prinsip UPE .....	10
Gambar 2.3 Hasil A-Scan .....	11
Gambar 2.4 Hasil B-Scan .....	12
Gambar 2.5 Gelombang primer .....	13
Gambar 2.6 Gelombang sekunder .....	14
Gambar 2.7 <i>Rayleigh wave dan love wave</i> .....	14
Gambar 2.8 Proses terjadinya impedansi akustik .....	16
Gambar 3.1 <i>Flowchart</i> penelitian .....	21
Gambar 3.2 Beton dengan lubang arah longitudinal .....	23
Gambar 3.3 Beton dengan lubang arah transversal .....	23
Gambar 3.4 Detail lubang pada beton arah longitudinal dimensi 2, 3 dan 4 inch .....	23
Gambar 3.5 Detail lubang pada beton arah longitudinal dimensi 2, 3 dan 4 inch .....	24
Gambar 3.6 Benda uji beton dengan bentuk silinder .....	24
Gambar 3.7 Alat <i>Ultrasonic Pulse Echo</i> (UPE) .....	27
Gambar 3.8 Pengujian UPE pada balok dengan lubang arah transversal .....	28
Gambar 3.9 Pengujian UPE pada balok dengan lubang arah longitudinal .....	28
Gambar 3.10 Skema pengujian A scan benda uji balok dengan lubang arah transversal ...	28
Gambar 3.11 Skema pengujian B scan benda uji balok dengan lubang arah transversal....	28
Gambar 3.12 Skema pengujian A scan benda uji balok dengan lubang arah longitudinal .	29
Gambar 3.13 Skema pengujian B scan benda uji balok dengan lubang arah longitudinal..	29
Gambar 4.1 Pembuatan benda uji. (a) uji <i>slump</i> , (b) pemadatan dengan <i>vibrator</i> .....	34
Gambar 4.2 Beton pada cetakan silinder .....	34
Gambar 4.3 Beton pada bekisting balok .....	35
Gambar 4.4 Pembuatan benda uji sebelum dan sesudah beton dituangkan .....	35
Gambar 4.5 (a) <i>Capping</i> benda uji silinder, (b) Pengujian kuat tekan menggunakan CTM36	
Gambar 4.6 Grafik hasil pengujian kuat tekan beton normal .....	37
Gambar 4.7 Grafik hasil pengujian kuat tekan beton dengan lubang arah transversal .....	38
Gambar 4.8 Hasil pengujian kuat tekan beton dengan lubang arah longitudinal .....	39
Gambar 4.9 Pengujian kuat tekan menggunakan metode <i>Hammer Test</i> .....	40
Gambar 4.10 Pengujian UPE. (a) kalibrasi alat, (b) pengujian beton dengan alat UPE .....	42

Gambar 4.11 Titik pengujian b-scan beton normal dan beton dengan lubang arah transversal .....	44
Gambar 4.12 titik pengujian b-scan beton dengan lubang arah longitudinal .....	45
Gambar 4.13 Skema pengujian UPE pada beton dengan lubang arah transversal .....	45
Gambar 4.14 Skema pengujian UPE pada beton dengan lubang arah longitudinal .....	45
Gambar 4.15 <i>Velocity</i> beton dengan lubang tanpa air dan berisi air .....	55
Gambar 4.16 Titik pengujian a-scan beton normal dan beton dengan lubang arah transversal .....	57
Gambar 4.17 Titik pengujian a-scan beton dengan lubang arah longitudinal .....	57
Gambar 4.18 Grafik perubahan t1 pada beton dengan lubang arah transversal .....	68
Gambar 4.19 Grafik perubahan t1 pada beton dengan lubang arah longitudinal .....	69
Gambar 4.20 Rekapitulasi rata-rata perubahan t1 .....	69





## DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul	Halaman
Lampiran 1.	Pembuatan Benda Uji	75
Lampiran 2.	Pengujian Kuat Tekan	77
Lampiran 3.	Pengujian Non Destructive Test	78
Lampiran 4.	Waveform dari Sampel Titik Pengujian UPE Metode A-scan	80



(Halaman sengaja dikosongkan)





## RINGKASAN

**Abid Febrian**, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Juli 2021.  
Pengaruh Intrusi Air pada Beton Normal terhadap Gelombang *Echo* dengan Menggunakan Metode UPE (*Ultrasonic Pulse Echo*). Dosen Pembimbing : Dr. Eng. Ir. Indradi Wijatmiko, ST., M.Eng (Pract) dan Dr. Eng. Ir. Ming Narto W., ST., MT., M.Sc.

Teknologi pada era revolusi industri 4.0 telah berkembang pesat seiring dengan berjalannya waktu, sehingga semakin beragamnya teknologi untuk mempermudah suatu pekerjaan konstruksi. Intrusi dapat terjadi karena beton yang selalu terkena air secara terus menerus. Intrusi yang terjadi pada bangunan seperti bendungan memiliki bahaya yang dapat mengakibatkan keruntuhan pada struktur utama. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis pengaruh adanya intrusi air pada beton terhadap pembacaan UPE.

Penelitian ini menggunakan benda uji beton tak bertulang dengan ukuran 20×20×70 cm. Terdapat tiga jenis benda uji pada penelitian ini berupa beton normal, beton dengan lubang arah transversal dan beton dengan lubang arah longitudinal. Variasi lubang yang digunakan pada penelitian ini memiliki dimensi lubang dengan ukuran 2 inch, 3 inch dan 4 inch. Pengujian dilakukan dengan bantuan alat UPE dengan metode a-scan dan b-scan pada seluruh benda uji.

Pengujian UPE dengan metode b-scan dan a-scan memberikan hasil dalam bentuk *scanning*, *waveform* dan *velocity*. Hasil *scanning* antara beton dengan intrusi air dan tidak memberikan perbedaan yang cukup sulit dibedakan secara visual. Hasil perbandingan *waveform* pada beton yang mengalami intrusi air dan tidak mendapatkan hasil berupa *waveform* yang lebih tinggi pada beton dengan intrusi air. Terjadinya penurunan pada waktu transmisi pada beton dengan lubang arah transversal sebesar 0.93%, sedangkan untuk beton dengan lubang arah longitudinal terjadi penurunan sebesar 13.33%. Hasil perbandingan *velocity* pada beton dengan intrusi air dan tidak memiliki hasil berupa *velocity* pada beton dengan intrusi air lebih tinggi dengan persentase kenaikan sebesar 0.202% pada beton dengan lubang arah transversal, sedangkan pada beton dengan arah longitudinal sebesar 1.91%. Berdasarkan hasil penelitian dapat ditarik kesimpulan berupa pengujian UPE terhadap beton yang mengalami intrusi air cukup sulit untuk diketahui.

**Kata Kunci** : UPE (*Ultrasonic Pulse Echo*), Beton dengan lubang, Intrusi Air

(Halaman sengaja dikosongkan)





## SUMMARY

*Abid Febrian, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering Brawijaya University, July 2021. Effect of Water Intrusion on Normal Concrete on Echo Waves by Using the UPE (Ultrasonic Pulse Echo) Method. Supervisor : Dr. eng. Ir. Indradi Wijatmiko, ST., M.Eng (Pract) and Dr. eng. Ir. Ming Narto W., ST., MT., M.Sc.*

*Technology in the era of the industrial revolution 4.0 has developed rapidly over time, so that there are increasingly diverse technologies to facilitate a construction job. Intrusion can occur because the concrete is always exposed to water continuously. Intrusion that occurs in buildings such as dams has a hazard that can lead to the collapse of the main structure. The purpose of this study was to analyze the effect of water intrusion on the concrete on UPE readings.*

*This study used an unreinforced concrete specimen with a size of 20×20×70 cm. There are three types of test objects in this study in the form of normal concrete, concrete with transverse holes and concrete with longitudinal holes. The hole variations used in this study have hole dimensions with sizes of 2 inches, 3 inches and 4 inches. The test was carried out with the help of the UPE tool with the a-scan and b-scan methods on all test objects.*

*UPE testing with b-scan and a-scan methods gives results in the form of scanning, waveform and velocity. The results of scanning between concrete and water intrusion do not provide a difference that is quite difficult to distinguish visually. The results of the comparison of waveforms on concrete that have water intrusion and do not get results in the form of a higher waveform on concrete with water intrusion. There was a decrease in transmission time in concrete with holes in the transverse direction of 0.93%, while for concrete with holes in the longitudinal direction there was a decrease of 13.33%. The results of the comparison of velocity in concrete with water intrusion and no results in the form of velocity in concrete with water intrusion were higher with a percentage increase of 0.202% in concrete with holes in the transverse direction, while in concrete with a longitudinal direction of 1.91%. Based on the results of the study, conclusions can be drawn in the form of UPE testing on concrete that has water intrusion, which is quite difficult to know.*

**Keywords :** *UPE (Ultrasonic Pulse Echo), Concrete with holes, Water Intrusion*

(Halaman sengaja dikosongkan)





## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Teknologi pada era revolusi industri 4.0 telah berkembang pesat seiring dengan berjalannya waktu, sehingga semakin beragamnya teknologi dalam mempermudah suatu pekerjaan konstruksi. Beton merupakan material utama yang sering digunakan dalam dunia konstruksi dengan fungsi menyalurkan dan menahan beban pada suatu struktur bangunan. Beton didapatkan dari hasil pencampuran antara semen, agregat kasar, agregat halus dan air yang telah ditentukan perbandingannya melalui *mix design*. Pemilihan beton sebagai bahan konstruksi dikarenakan keunggulannya dalam menahan kuat tekan yang lebih tinggi dibandingkan bahan konstruksi lainnya. Selama proses pembangunan, terdapat banyak faktor yang dapat mempengaruhi hasil akhir kekuatan bangunan. Bangunan yang kuat perlu dipastikan dapat menahan keseluruhan beban yang diterima atau masih diperlukan perkuatan pada struktur bangunan tersebut.

Bendungan beton merupakan salah satu contoh bangunan air yang termasuk ke dalam *heavy construction* dengan potensi bahaya serta risiko kerusakan besar. Potensi ini dapat terjadi apabila terdapat intrusi yang memasuki bendungan. Intrusi dapat terjadi karena beton pada bendungan selalu terkena air secara terus menerus. Intrusi yang terjadi pada bendungan ini memiliki bahaya yang dapat mengakibatkan keruntuhan pada struktur utama bendungan. Pengawasan dan pemeliharaan bangunan bendungan pasca konstruksi sangat diperlukan terutama untuk menghindari terjadinya intrusi yang terlalu berisiko.

Metode pengujian beton di dalam dunia konstruksi terdapat dua jenis, yaitu *Destructive Test* dan *Non-Destructive Test*. Metode *Non-Destructive Test* atau NDT adalah metode pengujian atau identifikasi pada suatu benda untuk mengetahui kecacatan tanpa merusak benda yang diuji. Pengujian ini merupakan metode yang efektif dan efisien dikarenakan tidak mengeluarkan tenaga yang lebih dan tidak memakan waktu yang lama dibandingkan dengan metode *destructive test*. Metode ini sering digunakan untuk penyelidikan pada saat masa konstruksi dan pasca konstruksi suatu bangunan. Metode NDT semakin berkembang dengan adanya metode serta alat pengujian baru seiring berjalannya waktu, sehingga pengawasan terhadap konstruksi suatu bangunan akan lebih mudah.



Salah satu jenis metode *Non-Destructive Test* berupa pengujian menggunakan cepat rambat gelombang echo atau *Ultrasonic Pulse Echo* (UPE). Alat yang digunakan pada pengujian UPE disebut *Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester* (PUNDIT). Gelombang ultrasonik echo yang dihasilkan oleh transduser (*transmitter*) akan dipancarkan berupa pemantulan sepanjang material dan pantulan tersebut akan diterima oleh transduser yang lain (*receiver*). Hasil dari cepat rambat gelombang tersebut akan terbaca pada alat dan data tersebut dapat menunjukkan bagaimana kerapatan, homogenitas, serta diskontinuitas dalam beton. Berdasarkan penelitian – penelitian yang sebelumnya, belum terdapat pembahasan secara jelas mengenai pengaruh intrusi air pada beton normal terhadap hasil pembacaan UPE.

### 1.2 Identifikasi Masalah

Adanya suatu kegagalan yang terjadi pada produk beton harus segera diatasi untuk mengurangi adanya kegagalan struktur. Salah satu permasalahan yang dapat terjadi yaitu intrusi air pada beton. Hal ini dapat menyebabkan adanya pengurangan sifat material beton itu sendiri. Pada bangunan air seperti bendungan, intrusi yang memasuki beton haruslah dicegah untuk menghindari terjadinya kegagalan yang fatal. Salah satu metode pengujian beton yang bersifat tak merusak (*Non Destructive Test*) adalah *Ultrasonic Pulse Echo* (UPE). Pengujian UPE tersebut mendapatkan hasil data berupa *scanning* pada beton, dari hasil *scanning* tersebut perlu diinterpretasikan untuk menentukan apakah di dalam beton tersebut terdapat intrusi air, sehingga diperlukan penelitian mengenai adanya intrusi air pada beton terhadap hasil pembacaan berupa *scanning* dari alat UPE

### 1.3 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang diidentifikasi, adapun rumusan masalah yang akan ditinjau dalam penelitian ini, antara lain :

1. Bagaimana perbandingan hasil pemindaian pada beton berlubang dengan beton yang mengalami intrusi air terhadap pengujian UPE ?
2. Bagaimana perbandingan *waveform* (bentuk gelombang) pada beton berlubang dengan beton yang mengalami intrusi air terhadap pengujian UPE ?
3. Bagaimana perbandingan cepat rambat pada beton berlubang dengan beton yang mengalami intrusi air terhadap pengujian UPE ?



#### 1.4 Batasan Masalah

Pada penelitian ini ada beberapa hal yang menjadi batasan masalah untuk menghindari pelebaran pembahasan, antara lain :

1. Penelitian ini dilakukan dengan benda uji berupa beton tak bertulang dengan balok berukuran 20 x 20 x 70 cm.
2. Penelitian ini menggunakan beton dengan kuat tekan 25 MPa dan proporsi campuran beton 1 : 1,6 : 2,6 dengan nilai Faktor Air Semen (FAS) sebesar 0,4.
3. Pada penelitian ini memiliki parameter kualitas yang dianalisis berdasarkan pengujian UPE (*Ultrasonic Pulse Echo*).
4. Variasi yang digunakan adalah variasi ukuran lubang pada beton yang dibuat menggunakan Pipa PVC dengan 3 ukuran diameter yang berbeda serta variasi pada arah peletakan lubang secara transversal dan longitudinal.
5. Sampel balok yang diuji berjumlah 1 buah setiap variasinya, jumlah sampel tersebut diambil dengan mempertimbangkan kondisi pandemi.
6. Laju rembesan air pada beton tidak diperhitungkan.
7. Penelitian ini menggunakan bantuan alat Proceq berupa Pundit PL-200 Pulse Echo dan schmidt rebound hammer sebagai alat pengujian NDT.

#### 1.5 Tujuan

Berdasarkan permasalahan yang diberikan, adapun tujuan dari dilakukannya penelitian ini, antara lain :

1. Menganalisis perbandingan hasil pembacaan pada beton berlubang dengan beton yang mengalami intrusi air terhadap pengujian UPE.
2. Menganalisis perbandingan *waveform* (bentuk gelombang) pada beton berlubang dengan beton yang mengalami intrusi air terhadap pengujian UPE.
3. Menganalisis perbandingan cepat rambat pada beton berlubang dengan beton yang mengalami intrusi air terhadap pengujian UPE.

#### 1.6 Manfaat

Berdasarkan tujuan yang tertera, adapun manfaat yang diharapkan dari penelitian ini, antara lain :

1. Bagi Penulis:
  - Memberi pembelajaran tentang pengujian *Non-Destructive Test*.

- Mengetahui pengaruh intrusi air pada beton dengan metode *Ultrasonic Pulse Echo* (UPE).

2. Bagi Pembaca::

- Penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat sebagai referensi pembelajaran untuk penelitian selanjutnya tentang pengujian *Ultrasonic Pulse Echo*.





## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Beton

Beton adalah bahan komposit yang didapatkan dari hasil pencampuran antara semen *portland*, agregat kasar, agregat halus dan air yang memiliki perbandingan campuran tertentu. Pada campuran beton, adapun bahan tambah lain yang bisa digunakan untuk meningkatkan *workability*, ketahanan serta waktu pengerasan beton. Beton juga merupakan material dengan sifat kuat tekan tinggi, tetapi memiliki kuat tarik yang rendah.

Kuat tekan dari beton yang baik bisa didapatkan dengan mempelajari sifat serta karakteristik dari setiap bahan penyusun beton. Besarnya kuat tekan beton juga dapat dipengaruhi oleh umur beton selama waktu setelah pengecoran dilakukan. Umur beton yang memiliki kuat tekan beton dalam kondisi optimal bisa didapatkan pada umur 28 hari setelah selesai pengecoran.

##### 2.1.1 Semen

Semen merupakan campuran dari bermacam-macam senyawa kimia yang memiliki sifat hidrolis. Sifat hidrolis semen berasal dari kandungan senyawa kalsium sulfat dan kalsium silikat yang terdapat di dalam semen. Hidrolis sendiri merupakan suatu jenis bahan yang jika disatukan dengan air akan menjadi satu dengan bahan-bahan lainnya yang dapat memadat, mengeras, tahan terhadap air dan tidak larut. Reaksi semen dengan air akan berlangsung secara *irreversible*, yang artinya kondisi ini tidak bisa kembali lagi ke kondisi semula. Menurut buku Bahan Bangunan (Hendro Suseno, 2010), semen merupakan bahan yang memiliki beragam kegunaan pada bangunan teknik sipil, baik dari segi struktural maupun non struktural seperti :

- a. Sebagai bahan baku utama beton.
- b. Sebagai bahan baku produk semen berserat.
- c. Sebagai bahan penambal retakan maupun keropos.
- d. Sebagai bahan perbaikan tanah.
- e. Sebagai bahan baku produk mortar seperti plester, plamir, acian, pipa, *paving block*, atap dan lain-lain.



### 2.1.2 Agregat Kasar

Agregat kasar adalah kerikil berupa hasil disintegrasi alami dari batuan atau batu pecah yang diperoleh dari industri pemecah batu, dengan ukuran butir antara 4,75 mm (No. 4) sampai 40 mm (No. 1½) (SNI 1969:2008). Pada campuran beton normal, agregat kasar berguna sebagai material penguat dan pengisi dengan komposisi 60% sampai dengan 70% dari total volume beton. Sifat agregat kasar sangat memengaruhi kekuatan akhir beton terhadap mutu beton, sehingga dalam kasus ini sangat diperlukan untuk mempelajari sifat agregat kasar yang dipakai pada campuran beton.

Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam pemeriksaan agregat kasar agar mendapatkan beton dengan kualitas yang baik, yaitu :

- a. Agregat kasar diharuskan kerikil yang bersifat keras dan tidak berpori. Sifat keras ini dibutuhkan agar mendapatkan beton yang keras pula, sedangkan sifat tidak berpori agar mendapatkan beton yang sulit tembus oleh air.
- b. Agregat kasar tidak boleh hancur karena adanya pengaruh iklim seperti hujan atau panas matahari.
- c. Agregat kasar harus bersifat bersih dari unsur organik serta zat-zat yang dapat mempengaruhi kualitas beton.
- d. Agregat kasar tidak terdapat campuran lain berupa lumpur yang melebihi 1% dari berat kering dan apabila lebih dari 1% perlu dicuci terlebih dahulu.

### 2.1.3 Agregat Halus

Agregat halus adalah pasir alam berupa hasil disintegrasi alami dari batuan atau pasir yang dihasilkan oleh industri pemecah batu, dengan ukuran butir terbesar 4,76 mm (No. 4) (SNI 1970:2008). Fungsi utama dari agregat halus pada campuran beton untuk pengisi rongga di antara agregat kasar, sehingga campuran beton akan memiliki ikatan agregat yang semakin kuat.

Gradasi agregat halus sangat penting pada campuran beton, karena akan mempengaruhi distribusi agregat halus pada campuran beton. Apabila suatu beton mempunyai kandungan butiran agregat halus yang seragam, maka kapasitas pori akan besar. Begitu juga dengan distribusi agregat halus yang tidak seragam akan menghasilkan volume pori yang kecil. Distribusi yang baik untuk campuran beton terjadi pada saat kondisi agregat halus tidak seragam, karena tingkat kemampatannya akan tinggi dan tidak memerlukan bahan pengikat yang banyak.



### 2.1.4 Air

Air adalah campuran yang sangat penting pada proses pembuatan material beton. Fungsi air pada campuran beton sebagai reaksi kimiawi dengan semen, pada reaksi tersebut akan terjadi pengerasan antara semen dan bahan penyusun lainnya. Secara umum air yang bagus sebagai campuran beton yaitu air bersih, tidak berbau, tidak berwarna dan tidak mengandung bahan-bahan yang dapat merusak beton.

Volume air yang dipakai pada campuran beton perlu diperhitungkan. Air yang berlebihan pada beton dapat menyebabkan Faktor Air Semen (FAS) tinggi, sehingga beton akan terlalu cair. Volume air pada beton yang terlalu rendah dapat menyebabkan penurunan FAS dan memperlambat proses hidrasi pada beton. Permasalahan tersebut dapat menurunkan kualitas beton setelah mengeras, oleh karena itu diperlukan perkiraan dari volume air untuk mendapatkan FAS yang optimal.

## 2.2 Perawatan Pada Beton (*Curing*)

*Curing* merupakan usaha yang dilakukan untuk merawat beton setelah dilakukan pengecoran. *Curing* bertujuan untuk memastikan reaksi hidrasi dari semen dapat terjadi secara optimal dengan menjaga kelembapannya, sehingga mutu dari beton yang diinginkan dapat tercapai. *Curing* juga bertujuan untuk menjaga beton agar tidak terjadi retak karena susut yang berlebihan karena kehilangan kelembapan yang cepat. Berikut metode *curing* yang dapat dilakukan antara lain :

- a. Menyemprotkan bahan khusus pada permukaan beton.
- b. Membasahi permukaan beton secara terus-menerus atau menutupinya dengan penutup yang lembap/basah.
- c. Meletakkan beton di dalam air.
- d. Meletakkan beton di ruang yang lembap.
- e. Menggenangi permukaan beton dengan air.
- f. Menggunakan uap bertekanan tinggi, uap dengan tekanan atmosferik, pelembab serta pemanas.

## 2.3 Pengujian Pada Beton

Pengujian pada beton merupakan cara untuk mengetahui mutu beton yang telah dibuat, sehingga dapat diketahui kesesuaian antara mutu beton yang direncanakan dengan mutu yang telah dibuat. Metode pengujian kuat tekan beton dibagi menjadi dua, antara lain *Destructive Test* dan *Non Destructive Test*.



### 2.3.1 Destructive Test

*Destructive Test* merupakan pengujian yang dilaksanakan terhadap suatu spesimen atau material hingga material tersebut menjadi hancur atau rusak. Pengujian yang umum dilakukan dengan cara berupa pengambilan sebagian sampel beton sebelum pengecoran untuk dilakukan pengujian di laboratorium. Beton yang dijadikan sampel untuk pengujian disimpan hingga umur 28 hari kemudian akan dilakukan pengujian. Pengujian *Destructive Test* ini mendapatkan hasil yang baik dikarenakan data kualitas beton dapat diketahui dari pengujian terhadap sampel secara langsung. Kelemahan dari pengujian ini memiliki hasil yang kurang mewakili mutu dari beton aktual terhadap struktur yang telah selesai. Beton yang telah jadi di lapangan memungkinkan terdapat perbedaan kualitas dengan beton yang telah diuji di laboratorium. Perbedaan ini dapat terjadi karena proses pengerjaan beton dan kondisi lingkungan di lapangan. Beberapa contoh pelaksanaan pengujian *Destructive Test* di laboratorium dapat berupa uji tekan, uji tarik, uji lentur dan sebagainya.

### 2.3.2 Non Destructive Test

*Non Destructive Test* merupakan metode pengujian kuat tekan beton tanpa merusak benda uji. Metode ini dinilai lebih efisien karena dapat digunakan untuk memeriksa atau mengetahui kualitas bangunan di lapangan, berbeda dengan metode *Destructive Test* yang dapat merusak struktur bangunan dan dapat mengurangi kekuatan struktur itu sendiri. Metode *Non Destructive Test* umumnya digunakan untuk memeriksa bangunan di lapangan yang akan dievaluasi.

Berikut beberapa metode *Non-Destructive Test* yang secara umum sering digunakan, diantaranya adalah:

- a. *Ultrasonic Testing*, pengujian yang menggunakan transmisi dari gelombang suara dengan frekuensi tinggi pada bahan untuk memeriksa cacat pada material.
- b. *Radiography Testing*, menggunakan sinar gama atau radiasi X untuk mengetahui bagian dan produk untuk melihat kekurangan.
- c. *Liquid Penetrant Testing*, metode yang menggunakan larutan zat warna yang dilapisi pada benda uji. Cairan tersebut akan berperilaku sebagai tinta dan memproyeksikan penetrasi yang terjebak dari kerusakan benda uji ke permukaan.
- d. *Magnetic Partikel Testing*, metode ini menginduksi medan magnet berupa bahan *ferromagnetic* dan kemudian ditambahkan partikel besi pada permukaan.
- e. *Eddy Current Testing*, metode ini menggunakan arus listrik yang didapatkan dalam bentuk bahan konduktif oleh medan magnet disebut dengan arus induksi.



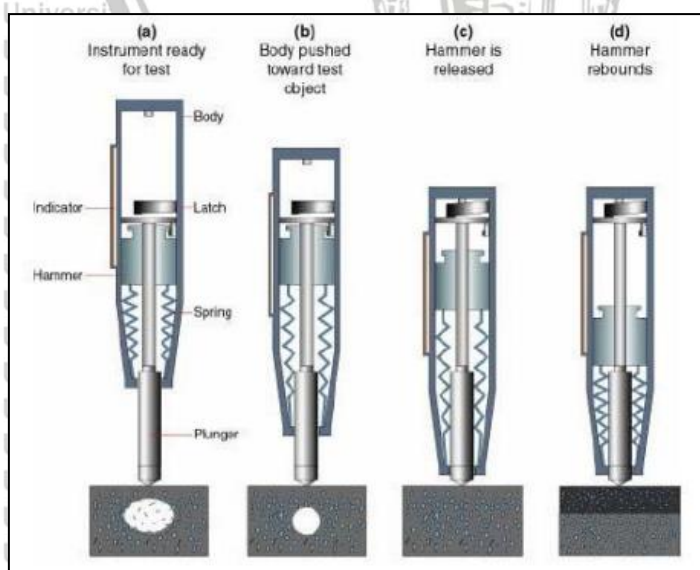
## 2.4 Pengujian Kuat Tekan dengan Metode Rebound Hammer Test

*Hammer test* adalah pengujian *Non Destructive Test* dengan menggunakan alat *Rebound Schmidt Hammer*, pada umumnya alat ini disebut dengan Schmidt Hammer. Alat ini ditemukan oleh Ernst Schmidt yang merupakan seorang insinyur dari Swiss. Pengujian ini bertujuan untuk memperoleh keseragaman material beton pada struktur (mutu beton) serta juga berguna untuk pembandingan mutu beton yang berada di lapangan dengan mutu beton yang direncanakan.

Metode pengujian ini dapat dilaksanakan dengan memberikan beban impact terhadap permukaan beton. Cara pengujian ini menggunakan massa yang diberikan dengan memakai energi yang besarnya tertentu. Pengukuran jarak dari pantulan yang ditimbulkan berdasarkan massa tersebut terhadap permukaan beton dapat menghasilkan tanda kekerasan. Pengujian yang dilakukan dengan metode ini memiliki waktu yang singkat, sehingga dengan area pengujian yang luas dapat diatasi dengan waktu yang cepat.

Alat ini sangat sensitif terhadap variasi yang terdapat pada bagian permukaan beton, contohnya lokasi partikel pada beberapa segmen yang dekat dengan area permukaan. Hal tersebut menyebabkan pengambilan sampel beberapa kali untuk pengukuran pada lokasi yang ditinjau. Hasil rata-rata dari BS (*British Standards*) mengharuskan pengambilan sampel antara 9 hingga 25 kali pengujian pada setiap daerah dengan luas maksimum 3 cm<sup>2</sup>. Alat ini secara umum dapat difungsikan untuk:

- Mengetahui keseragaman dari kualitas mutu beton.
- Mengetahui perkiraan dari kuat tekan beton.



Gambar 2.1 Bagian-bagian dan prinsip kerja alat uji hammer test

Sumber : Heri Khoeri (2016)

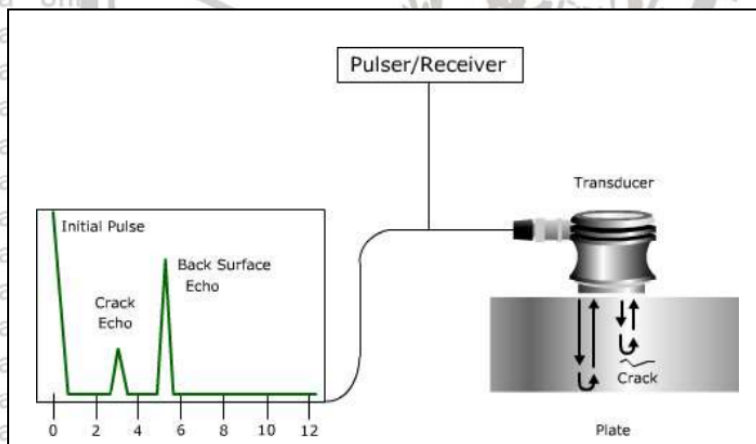


## 2.5 Ultrasonic Pulse Echo (UPE)

### 2.5.1 Prinsip Ultrasonic Pulse Echo (UPE)

*Ultrasonic Pulse Echo* (UPE) adalah suatu alat yang mengaplikasikan sifat dari pemantulan gelombang ultrasonik. Prinsip dari alat ini yaitu gelombang suara frekuensi tinggi dipancarkan dari alat uji ke benda uji kemudian gelombang dipantulkan kembali ke alat uji. Beberapa aplikasi dari metode ini dapat difungsikan untuk mengetahui letak cacat (rongga, pipa, dan *honeycomb*) serta pengukuran dimensi dari satu sisi.

Alat UPE terdiri dari beberapa unit fungsional seperti *transducer*, *pulser* dan perangkat *display* untuk mengetahui hasil pembacaan. *Pulser* merupakan alat elektronik yang digunakan untuk menghasilkan listrik dengan voltase tinggi. *Transducer* mendapatkan energi ultrasonik dengan frekuensi tinggi. Pada saat ditemukan cacat pada jalur yang dilewati, energi tersebut akan dipantulkan kembali dari lokasi cacat. Pantulan gelombang tersebut berubah menjadi sinyal elektrik oleh *transducer* dan diperlihatkan pada layar. Setelah memperoleh waktu tempuh dan cepat rambat gelombang maka jarak tempuh sinyal bisa diketahui. Informasi terkait letak reflektor, ukurannya dan informasi lainnya bisa diketahui dari pembacaan sinyal yang dihasilkan.



Gambar 2.2 Prinsip UPE

Sumber : <https://hesa.co.id>

Pada saat gelombang *echo* menyentuh permukaan benda uji, maka akan muncul sinyal pertama yang merupakan suatu tanda dari gelombang pantul permukaan benda uji. Sinyal kedua atau biasa disebut *backwall echo* akan muncul ketika gelombang merambat ke dalam benda uji sampai menyentuh dasar dari benda uji. Apabila dalam lintasan benda uji terdapat diskontinuitas, maka akan terdapat kemunculan sinyal berupa *transmission pulse* dan *backwall echo* yang secara umum disebut dengan *defect echo*.



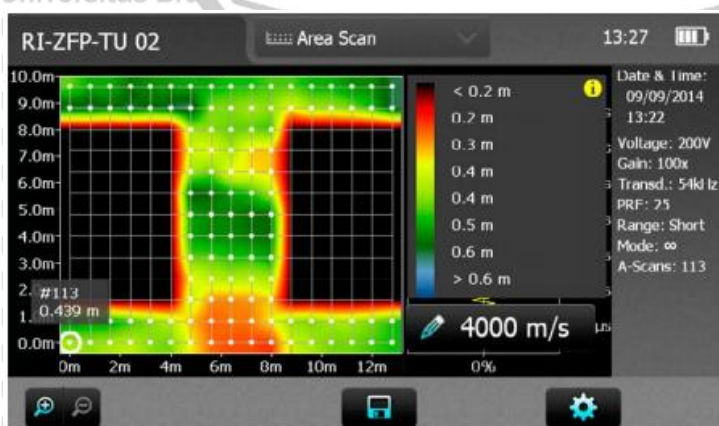
## 2.5.2 Metode Pengujian Ultrasonic Pulse Echo (UPE)

Pengujian dilakukan dengan cara mengukur *echo* atau sinyal pantul dari gelombang ultrasonik yang ditransmisikan transduser ke benda uji yang di-*scanning*. Ketika gelombang ultrasonik melalui benda uji, beberapa gelombang *echo* akan diteruskan dan sebagian lainnya akan dipantulkan kembali sebagai tanda berupa sinyal balik atau *echo*. Gelombang *Echo* yang dipantulkan oleh benda uji tersebut akan diterima oleh *receiver*. Data gelombang ultrasonik dapat ditampilkan dalam beberapa format.

Beberapa format yang umumnya diketahui adalah *A-scan* dan *B-scan*. Masing-masing format penyajian tersebut memiliki perbedaannya sendiri dalam mengevaluasi bagian dari material beton yang diuji. Nilai utama dari *B-scan* adalah kemampuannya untuk menunjukkan distribusi cacat pada suatu bagian pada penampang melintang dari bagian tersebut. *B-scan* dapat digunakan untuk pemindaian secara cepat pada bagian tertentu, untuk pemeriksaan yang lebih teliti dapat digunakan pemindaian *A-scan* (IAEA, *Manual for Ultrasonic Testing*).

### 2.5.2.1 A-Scan

Pengujian *A-scan* menampilkan gambar dua dimensi dari suatu elemen struktural. Pengujian ini dilakukan dengan membagi beberapa bagian dari luasan benda uji dalam satuan dimensi panjang. Penyajiannya menampilkan gambar dua dimensi dari elemen struktural yang diuji. Berdasarkan lokasi dan amplitudo gema yang ditampilkan pada layar, maka kedalaman cacat pada material dan perkiraan ukuran cacat dapat dibuat. Hasil dari *A-scan* ini didapat berupa waktu tempuh, jarak dan kecepatan. Jumlah energi yang diterima di tempatkan di sepanjang sumbu vertikal dan waktu (terkait dengan jarak yang ditempuh dalam material) ditampilkan di sepanjang sumbu horizontal.



Gambar 2.3 Hasil A-Scan

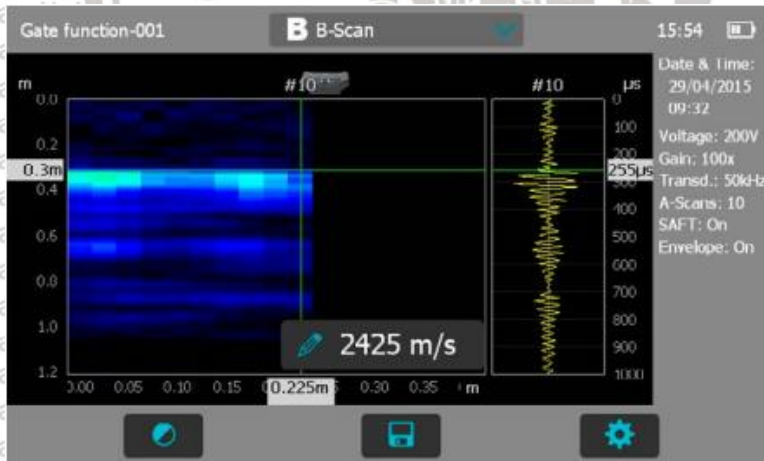
Sumber : PROCEQ, 2017



### 2.5.2.2 B-Scan

Format penyajian B-scan mampu secara otomatis menyajikan data profil dari spesimen yang terdapat dalam benda yang diuji. Pada penyajian ini, sepanjang sumbu horizontal ditampilkan posisi dari transduser dan sepanjang sumbu vertikal ditampilkan *travel time* dari gelombang ultrasonik. Pada *B-scan* dapat diketahui kedalaman dari reflektor dan estimasi ukurannya.

Skema warna digunakan untuk menggambarkan kekuatan pantulan gelombang ultrasonik. Warna yang berbeda mewakili intensitas gelombang yang dipantulkan. Sumber refleksi dapat berupa bahan yang berbeda seperti rongga udara (retak, lubang, dll.) Di dalam beton skala warna dari biru – hijau – kuning – merah, tergantung pada amplitudo gelombang yang dipantulkan, dengan hitam mewakili tidak adanya pantulan. Dalam kebanyakan kasus, daya pantul rendah digambarkan menggunakan warna dingin (biru dan hijau), sedangkan daya pantul tinggi disajikan menggunakan warna panas (merah dan kuning). Daya pantulan tinggi dalam banyak kasus akan menjadi indikasi keberadaan objek dan diskontinuitas, seperti tulangan, retak, delaminasi, dan rongga. Daya pantul yang rendah pada kebanyakan kasus akan mewakili kondisi yang baik.



Gambar 2.4 Hasil B-Scan

Sumber : PROCEQ, 2017

## 2.6 Gelombang Mekanik

Gelombang mekanik merupakan gelombang yang perambatannya membutuhkan suatu medium supaya dapat menyebarkan energi sebagai proses penyaluran gelombang. Medium penyebaran dapat melewati zat padat, cair maupun gas. Gelombang mekanik dapat ditinjau dari arah perambatan dan getar yang dibagi menjadi 2 jenis, yaitu:



#### a. Gelombang Longitudinal

Gelombang longitudinal merupakan jenis gelombang dengan arah perambatan gelombang yang sejajar sesuai dengan arah getarannya. Ciri dari gelombang *longitudinal* yaitu terdapat regangan serta rapatan pada gelombang tersebut.

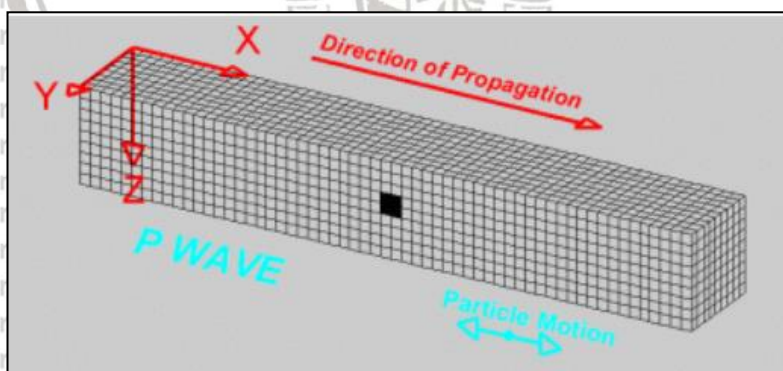
#### b. Gelombang Transversal

Gelombang transversal merupakan jenis gelombang dengan arah perambatan gelombang yang tegak lurus sesuai dengan arah getarnya. Ciri dari gelombang transversal yaitu terdapat suatu puncak serta lembah pada gelombang tersebut.

Suatu benda akan terdeformasi apabila permukaan dari suatu media padat elastis dapat dipengaruhi oleh getaran ataupun gaya dinamis, oleh karena itu akan didapatkan pembagian berupa 3 jenis dari gelombang mekanis, yaitu:

#### 1. P-Wave (Gelombang Primer)

Gelombang Primer termasuk jenis dari gelombang longitudinal, yang mana memiliki arah pergerakan dari partikel akan searah sesuai dengan arah perambatan gelombang. Gelombang primer merambat dengan kecepatan tertentu berdasarkan kekerasan medium yang dilewatinya. Kecepatan gelombang akan semakin cepat apabila melalui medium yang lebih padat. Cepat rambat gelombang yang semakin besar, maka amplitudo akan semakin kecil dan gelombang ini hanya dapat merambat melalui medium zat padat, cair dan gas.

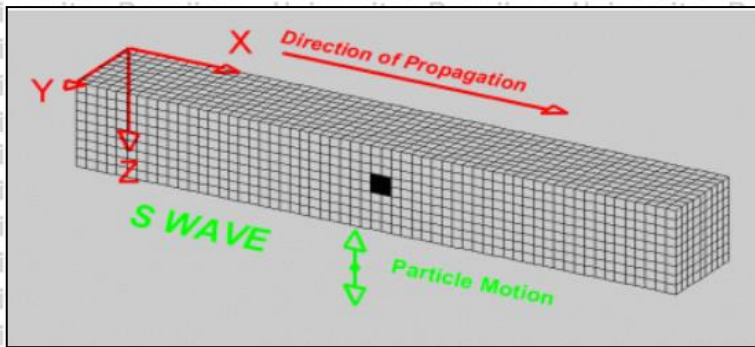


Gambar 2.5 Gelombang primer

#### 2. S-Wave (Gelombang Sekunder)

Gelombang Sekunder termasuk jenis gelombang transversal, yang mana arah dari pergerakan partikel akan tegak lurus sesuai arah rambat gelombang. Gelombang sekunder lebih lambat jika dibandingkan dengan gelombang primer dan hanya merambat melewati medium padat serta tidak dapat melalui media cair.

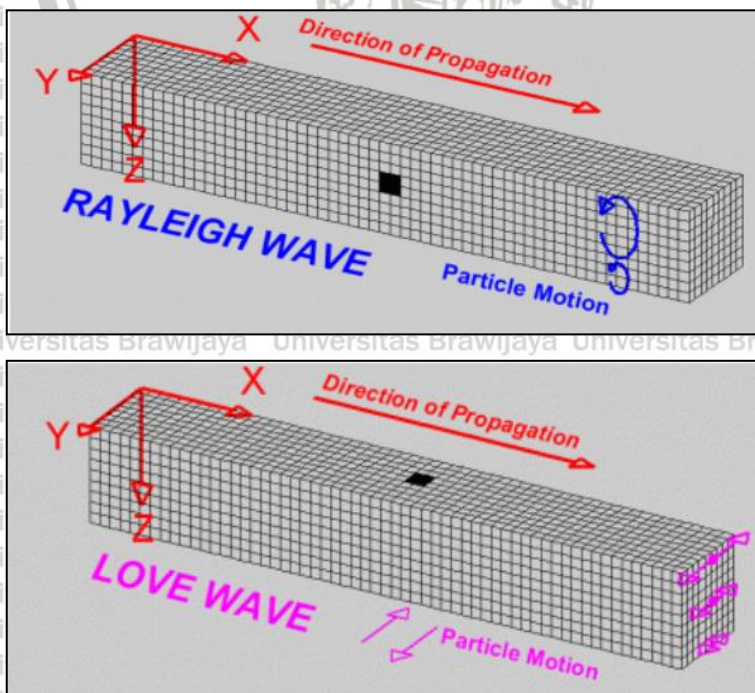




Gambar 2.6 Gelombang sekunder

### 3. Gelombang Permukaan (Surface Wave)

Gelombang permukaan (*Surface wave*) merupakan gelombang yang dapat merambat melewati permukaan medium serta amplitudonya akan semakin rendah jika gelombang ini merambat ke dalam medium. Gelombang ini secara umum memiliki frekuensi di bawah 500 Khz. Jenis dari gelombang ini yaitu *Reyleigh Wave* dan *Love Wave*. *Rayleigh wave* adalah gelombang yang merambat pada area permukaan saja dan perambatannya hanya pada media padat. *Love wave* adalah gelombang yang hanya dapat merambat di lapisan permukaan, sehingga gelombang *love wave* hampir sama seperti gelombang sekunder tetapi perambatannya pada bidang horizontal. Getaran dari gelombang permukaan ini memiliki arah yang berlawanan dengan arah perambatannya.



Gambar 2.7 Rayleigh wave dan love wave



## 2.7 Impedansi Akustik

Pemindai ultrasonik berlandaskan pantulan suara (*echo*) dari area batas pemantul. Apabila gelombang melewati material yang berbeda seperti udara, baja, pipa, dan material non homogenitas lainnya maka persentase pantulan pun akan berbeda. Jumlah pantulan dapat ditentukan dari perbedaan impedansi akustik di area batasannya. Impedansi akustik ( $Z$ ) merupakan hasil perkalian antara densitas ( $\rho$ ) berdasarkan medium yang tegak lurus dengan gelombang dan cepat rambat suara ( $v$ ) pada medium. Maka impedansi akustik dapat dirumuskan menjadi :

$$Z = \rho \times v$$

Dimana :

- $Z$  = impedansi akustik dalam  $\text{kg/m}^2\text{s}$  atau rayl
- $\rho$  = densitas atau massa jenis dalam  $\text{kg/m}^3$
- $v$  = cepat rambat gelombang dalam  $\text{m/s}$

Berikut merupakan nilai perkiraan impedansi untuk beberapa material yang dapat digunakan sebagai acuan.

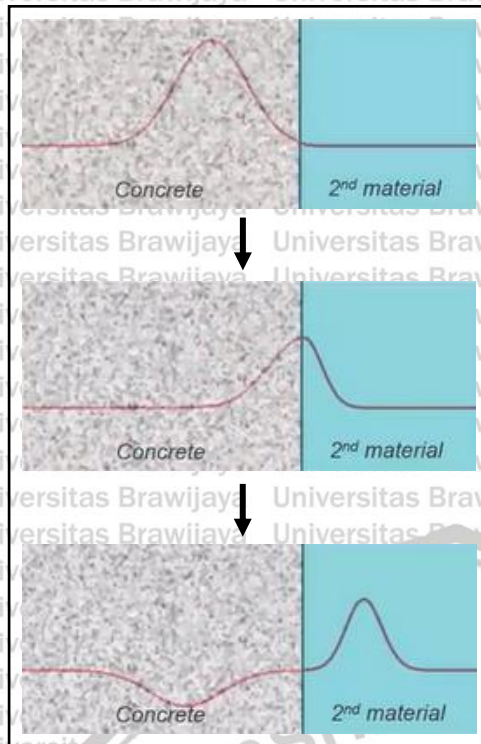
Tabel 2.1 Cepat rambat impedansi akustik di beberapa material

No.	Material	$v$ (m/s)	$\rho$ ( $\text{kg/m}^3$ )	$Z$ (MRayls)
1	Water at 20°C	1480	1000	1,483
2	Water at 60 °C	1550	1000	1,55
3	Concrete	3100	2600	8,0
4	Iron	5900	7690	46,4
5	Brick	4300	1700	7,4
6	Steel Mild	5900	7890	46
7	Steel Stainless	5900	7890	45,7
8	Alumina	10520	3860	40,6

Sumber : <https://www.signal-processing.com/table.php>

Gelombang ultrasonik yang dipantulkan ke permukaan membawa beberapa informasi dalam bentuk frekuensi resonansi. Peran dari impedansi akustik adalah :

1. Penentuan refleksi dan transmisi gelombang di antara dua material yang mempunyai impedansi akustik tidak sama.
2. merancang kebutuhan transduser untuk pengujian.
3. Memprediksi penyerapan gelombang suara pada medium.



Gambar 2.8 Proses terjadinya impedansi akustik

## 2.8 Intrusi Air Pada Beton

Kegagalan pada struktur beton adalah adanya keropos pada beton yang dapat menyebabkan air dapat masuk ke dalam beton tersebut. Intrusi air pada beton akan mengurangi kualitas dari beton. Adanya partikel air di dalam beton dapat mempengaruhi kerapatannya. Intrusi dapat terjadi disebabkan karena terdapat rongga pada beton, sehingga air bisa masuk ke dalam beton. Penggunaan material beton untuk bahan utama konstruksi. Intrusi air dapat membuat terjadinya serangan klorida dan sulfat terhadap tulangan baja. Terjadinya korosi pada baja tulangan dapat berdampak buruk pada struktur beton karena akan mengurangi kualitas dari kekuatan beton tersebut.

## 2.9 Hubungan Intrusi Air dengan Cepat Rambat Gelombang Echo

*Ultrasonic Pulse Echo* (UPE) memiliki fungsi utama untuk mendapatkan kualitas berupa mutu beton berdasarkan pantulan gelombang yang dipengaruhi oleh material penyusunnya. Pemantulan dapat terjadi di permukaan material yang bersebelahan dan mempunyai perbedaan impedansi akustik. Pada saat gelombang melalui material beton dengan impedansi akustik yang tidak sama dari material yang dilewati sebelumnya, sehingga gelombang akan terbagi menjadi dua. Sebagian gelombang akan dipantulkan kembali ke permukaan dan sebagian lagi akan diteruskan merambat ke dalam medium selanjutnya.



Amplitudo gelombang dilemahkan karena adanya penyerapan energi dan materi yang dipantulkan. Hal ini mempengaruhi gelombang *echo* yang ditransmisikan kembali ke transduser (*receiver*) sangat kecil jika dibandingkan dengan gelombang pertama yang dihasilkan transduser (*transmitter*). Air yang masuk ke pori-pori beton akan mempengaruhi impedansi akustik yang diterima oleh transduser (*receiver*). Hal ini terjadi karena energi yang dipantulkan dari gelombang ultrasonik pada perbatasan antara dari dua material dengan impedansi akustik yang berbeda. Koefisien pantul mendeskripsikan intensitas gelombang datang pada suatu permukaan yang dipantulkan kembali. Ketika impedansi akustik material di kedua sisi batas diketahui, gelombang datang yang dipantulkan dapat dihitung sebagai :

$$R = \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2$$

Dimana :

- $Z_1$  = impedansi akustik pada lapisan pertama
- $Z_2$  = impedansi akustik pada lapisan kedua

## 2.10 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu merupakan referensi pada saat melaksanakan penelitian terbaru. Berdasarkan perolehan dari penelitian terdahulu, terdapat kelebihan maupun kekurangan dari penelitian sebelumnya yang berguna untuk bahan pembelajaran sebagai sumber referensi atau penyempurnaan penelitian selanjutnya. Berikut ini merupakan berbagai uraian singkat terkait hasil dari penelitian terdahulu yang dapat dipakai sebagai penyusunan penelitian ini.

Tabel 2.2 Daftar penelitian terdahulu

No.	Nama Peneliti, Tahun	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
1	Gabrielle Allena, Indradi Wijatmiko, Indra Waluyohadi (2020)	Pengaruh Variasi <i>Coating</i> pada Beton Kerosok Terhadap Gelombang Echo dengan Menggunakan Metode UPE ( <i>Ultrasonic Pulse Echo</i> )	1. Pengujian <i>Non-Destructive Test</i> terhadap beton yang sudah dilapisi <i>coating</i> menggunakan metode UPE masih dapat dilakukan karena kenaikan cepat rambatnya tidak terlalu signifikan. 2. Adanya pengaruh acian pada beton terhadap pembacaan A-scan dan B-scan menggunakan metode UPE.

2	Teguh Dwi Saputra, Sugeng P. Budio, Indra Waluyohadi (2017)	Investigasi Rongga dan Kedalaman Retak pada Balok Beton dengan UPE dan UPV	<p>1. Alat UPE berfungsi secara akurat dan konsisten dalam mengindikasikan pembacaan rongga pada beton. Faktor dari <i>human error</i> dan homogenitas dalam beton dapat mempengaruhi hasil pembacaan alat UPE.</p> <p>2. Alat UPV berfungsi secara akurat dan konsisten dalam melakukan pembacaan terhadap kedalaman retak. Faktor dari penggambaran retak yang tidak sempurna serta jarak antar retak yang terlalu dekat dapat mempengaruhi hasil dari pembacaan alat UPV.</p>
3	-	Pra Lab Penelitian Pengaruh Intrusi Air pada Beton Normal Terhadap Gelombang <i>Echo</i> dengan Menggunakan Metode UPE ( <i>Ultrasonic Pulse Echo</i> )	Terdapat perbedaan spektrum warna pada beton yang berisi air, hal ini terjadi karena terdapat perubahan material terhadap gelombang <i>Echo</i> yang dipantulkan



### BAB III

#### METODE PENELITIAN

##### 3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dimulai pada bulan Maret 2021 sampai selesai dan dilakukan di Laboratorium Struktur dan Bahan Konstruksi Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang.

##### 3.2 Peralatan dan Bahan Penelitian

###### 3.2.1 Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan pada penelitian yaitu :

- a. Ayakan untuk agregat kasar dan halus
- b. Piknometer dengan kapasitas 500 ml
- c. Kerucut terpancung dan batang penumbuk
- d. Timbangan
- e. Kerucut Abrahm
- f. Tongkat penusuk baja atau *vibrator*
- g. Meteran
- h. Cetakan silinder  $15 \times 30$  cm
- i. Bekisting balok beton ukuran  $20 \times 20 \times 70$  cm
- j. Pipa PVC diameter 2 inch, 3 inch, dan 4 inch
- k. Pipa siku diameter 2 inch, 3 inch, dan 4 inch
- l. *Compression Testing Machine* (CTM)
- m. *Alat Rebound Schmidt Hammer*
- n. Alat pengujian UPE

###### 3.2.2 Bahan Penelitian

Adapun beberapa bahan yang dibutuhkan pada penelitian yaitu :

- a. *Portland Composite Cement* (PCC)
- b. Agregat kasar (kerikil)
- c. Agregat halus (pasir)
- d. Air

### 3.3 Variabel Penelitian

Terdapat beberapa jenis variabel pada penelitian yang akan dilakukan, yaitu :

- a. *Interpendent Variable*, merupakan variabel bebas yang faktornya dibebaskan untuk menentukan maupun mengukur sesuai kebutuhan dari peneliti yang akan memengaruhi variabel lainnya. Variabel bebas pada penelitian ini adalah variasi peletakan, penentuan diameter dan jumlah pipa PVC yang digunakan.
- b. *Dependent Variable*, merupakan variabel terikat yang faktornya diteliti untuk mengetahui adanya pengaruh yang didapatkan dari variabel bebas. Variabel terikat pada penelitian ini menggunakan hasil dari pembacaan alat uji UPE pada sampel beton.
- c. *Control Variable*, merupakan variabel kontrol yang mengontrol pengaruh dari variabel bebas terhadap variabel terikat dan tidak dipengaruhi oleh variabel yang tidak diteliti. Variabel kontrol yang digunakan pada penelitian ini adalah balok beton normal dan balok beton dengan lubang tanpa air.

### 3.4 Analisis Bahan

#### 3.4.1 Semen

Semen yang digunakan pada penelitian ini yaitu *Portland Composite Cement* (PCC) tipe I. Sebelum semen digunakan untuk penelitian ini, semen perlu dipastikan lebih dahulu dengan cara memperhatikan bentuk dari semen tersebut.

#### 3.4.2 Agregat Kasar

Pada penelitian ini menggunakan material kerikil berdasarkan batu pecah yang sudah dilakukan pengujian sebelum proses pembuatan benda uji. Pengujiannya terdiri dari analisis gradasi, kadar air, berat jenis dan penyerapan air, serta berat isi.

#### 3.4.3 Agregat Halus

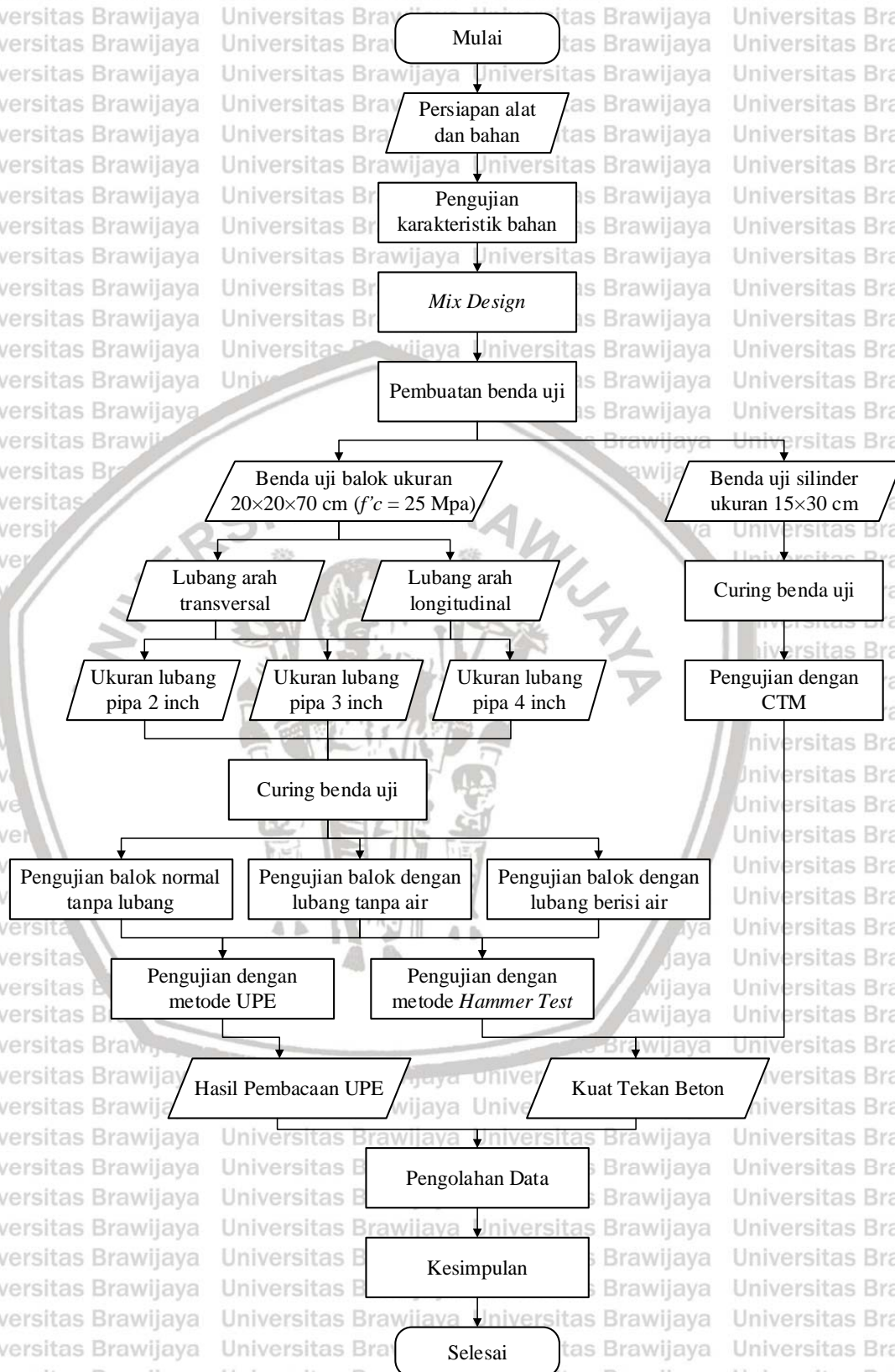
Pada penelitian ini menggunakan pasir alam yang sudah dilakukan pengujian sebelum dilakukan proses pembuatan benda uji. Metode pengujian agregat halus dilakukan sama dengan pengujian pada agregat kasar.

#### 3.4.4 Air

Air yang digunakan dalam penelitian ini yaitu air bersih dari saluran PDAM Kota Malang yang tidak berwarna serta tidak berbau.



### 3.5 Tahapan Penelitian



Gambar 3.1 Flowchart penelitian

### 3.6 Rancangan Penelitian

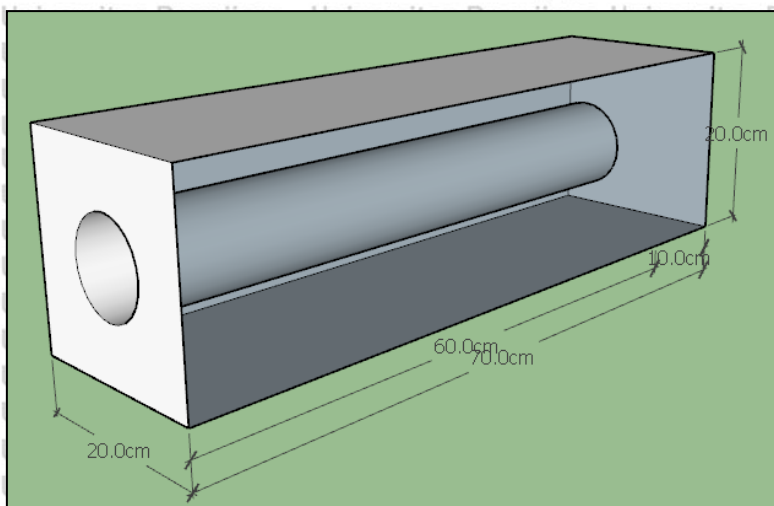
Pada penelitian ini menggunakan sampel benda uji balok sebagai benda uji utama dan benda uji silinder sebagai kontrol kuat tekan. Benda uji berbentuk silinder memiliki tinggi 30 cm dan diameter 15 cm. Benda uji berbentuk balok memiliki ukuran  $20 \times 20 \times 70$  cm serta dibagi menjadi 2 jenis, yaitu balok normal tanpa lubang dan balok dengan lubang yang dibuat menggunakan pipa PVC. Diameter pipa yang digunakan dalam penelitian memiliki 3 variasi ukuran, lubang dengan ukuran pipa PVC diameter 2 inch, 3 inch, dan 4 inch. Pipa PVC dengan ukuran 2 inch memiliki diameter terluar 6 cm, ukuran 3 inch memiliki diameter terluar 9 cm dan untuk ukuran 4 inch memiliki diameter terluar 11 cm.

Benda uji yang digunakan pada penelitian ini menggunakan proporsi campuran beton 1 : 1,6 : 2,6 dengan nilai Faktor Air Semen (FAS) sebesar 0,4. Lubang yang dibuat pada benda uji balok memiliki 2 arah, yaitu arah transversal dan longitudinal. Arah transversal yang dimaksud merupakan peletakan pipa PVC yang disusun sebanyak 3 pipa pada penampang balok  $20 \times 70$  cm. Sedangkan untuk arah longitudinal yang dimaksud merupakan 1 pipa PVC yang diletakkan pada penampang balok  $20 \times 20$  cm. Benda uji yang dibuat sejumlah 1 untuk masing-masing variasinya. Sedangkan untuk benda uji silinder, jumlah yang dibuat minimal 3 sampel pada setiap 1 kali pengecoran. Arah transversal dan longitudinal disesuaikan dengan arah memanjang benda uji balok.

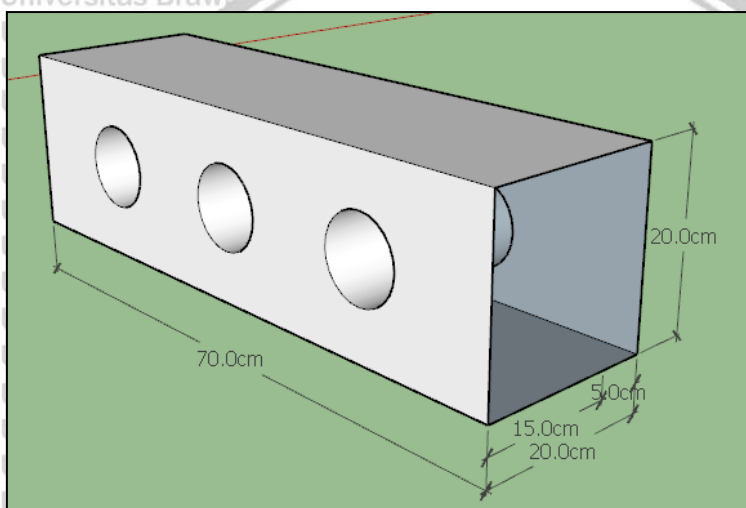
Tabel 3.1 Rancangan benda uji

Kode Benda Uji	Benda Uji	Jenis Benda Uji	Volume Benda Uji ( $m^3$ )	Jumlah Benda Uji
A1	Beton dengan lubang arah transversal, diameter 2 inch	Balok	0,028	1
A2	Beton dengan lubang arah transversal, diameter 3 inch	Balok	0,028	1
A3	Beton dengan lubang arah transversal, diameter 4 inch	Balok	0,028	1
B1	Beton dengan lubang arah longitudinal, diameter 2 inch	Balok	0,028	1
B2	Beton dengan lubang arah longitudinal, diameter 3 inch	Balok	0,028	1
B3	Beton dengan lubang arah longitudinal, diameter 4 inch	Balok	0,028	1
C	Beton Normal Tanpa Lubang	Balok	0,028	1
D	Beton Normal Tanpa Lubang	Silinder	0,0053	21

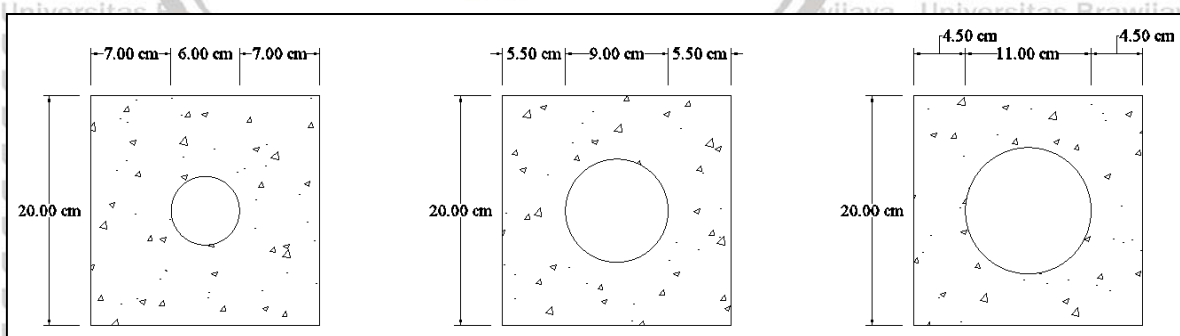




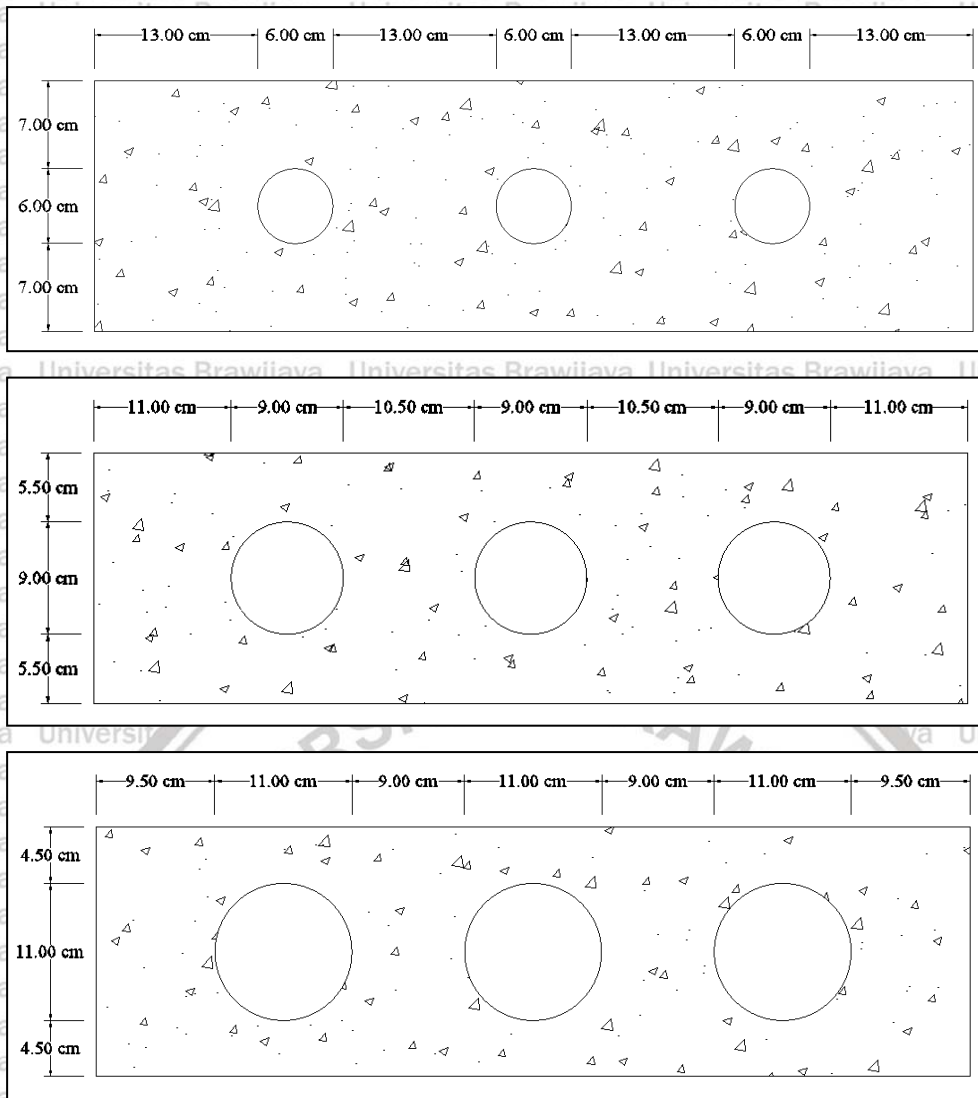
Gambar 3.2 Beton dengan lubang arah longitudinal



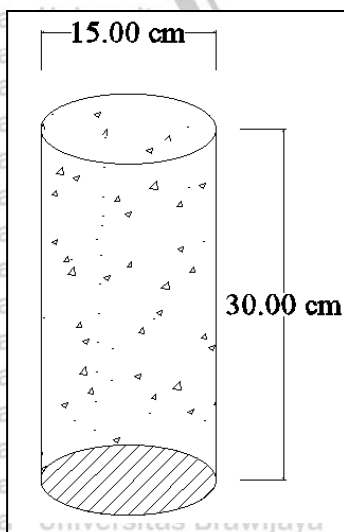
Gambar 3.3 Beton dengan lubang arah transversal



Gambar 3.4 Detail lubang pada beton arah longitudinal dimensi 2, 3 dan 4 inch.



Gambar 3.5 Detail lubang pada beton arah longitudinal dimensi 2, 3 dan 4 inch.



Gambar 3.6 Benda uji beton dengan bentuk silinder



### 3.7 Prosedur Penelitian

#### 3.7.1 Pengujian Bahan Dasar (*Mix Design*)

Pengujian bahan dasar berfungsi untuk mengetahui analisis butiran, penyerapan air, berat isi, serta berat jenis dan kadar air. Pengujian ini berlandaskan pada buku petunjuk praktikum teknologi beton dari Laboratorium Struktur dan Bahan Konstruksi Jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya. Pengujian ini dilakukan dengan berdasarkan panduan SNI yang tertera pada buku pedoman, yaitu :

- SNI ASTM C136-2012 untuk metode pengujian analisis saringan agregat halus dan agregat kasar.
- SNI 1969:2008 tentang cara uji berat jenis dan penyerapan air agregat kasar.
- SNI 1970:2008 tentang cara uji berat jenis dan penyerapan air agregat halus.
- SNI 1971:2011 tentang cara uji kadar air total agregat dengan pengeringan
- SNI 03-4804-1998 untuk metode pengujian berat isi agregat.

#### 3.7.2 Pengujian Beton Segar (*Fresh Concrete*)

Pengujian ini sering disebut dengan uji slump yang dilaksanakan setelah proses pengadukan campuran beton selesai. Uji slump bertujuan untuk mengetahui nilai *workability* dari suatu campuran pembuatan beton segar. *Workability* (kelecekan) adalah istilah yang menggambarkan seberapa mudahnya *fresh concrete* untuk dapat dikerjakan dan dipadatkan serta tidak terjadi pemisahan atau segregasi.

#### 3.7.3 Pembuatan Benda Uji

Langkah – langkah dalam pembuatan benda uji pada penelitian ini sebagai berikut :

1. Mempersiapkan material campuran beton berdasarkan kuantitas yang telah ditentukan dengan *mix design* yang direncanakan.
2. Memasukkan material – material yang telah ditimbang sebelumnya ke dalam alat pengaduk beton, lalu beton dibiarkan selama lebih kurang 15 menit sampai campuran menyatu.
3. Setelah proses pencampuran selesai, mengambil beberapa campuran beton segar untuk sampel dari pengujian slump.
4. Menyiapkan bekisting balok beton yang sesuai dengan ukuran yang telah direncanakan dan mengolesi bagian dalamnya dengan oli. Pengolesan oli dilakukan agar beton mudah dilepaskan dari bekisting ketika sudah mengeras.



5. Mengolesi pipa PVC dengan oli agar tidak menempel dengan beton.
6. Menyusun letak pipa PVC yang telah diolesi oli pada bekisting balok sesuai dengan ukuran – ukuran yang telah ditentukan. Dalam menyusun pipa ini, digunakan benang tali kasur untuk menahan agar pipa tidak bergoyang saat beton dituangkan ke dalam bekisting.
7. Menuang campuran beton ke dalam bekisting balok dan melakukan pemadatan menggunakan tongkat penusuk baja.
8. Menuang campuran beton ke dalam bekisting silinder dan melakukan pemadatan menggunakan tongkat penusuk baja. Benda uji silinder ini nantinya digunakan sebagai pengontrol kuat tekan beton.
9. Setelah 24 jam dan campuran beton telah mengeras, melepas bekisting dan pipa dari beton untuk kemudian dilakukan *curing*.

#### 3.7.4 Perawatan Benda Uji

Benda uji yang sudah disiapkan selama lebih kurang 24 jam, dilepaskan dari bekisting untuk kemudian dilaksanakan proses dari perawatan sampel benda uji. Perawatan (*curing*) ini bertujuan supaya proses hidrasi senyawa semen tidak terjadi masalah yang dapat menyebabkan beton mudah kehilangan air. Proses *curing* ini dilaksanakan dengan cara benda uji balok ditutupi dengan kain basah dan dibasahi secara berkala setiap hari menggunakan air. Sedangkan untuk proses *curing* benda uji silinder dilakukan dengan cara merendam di dalam air.

Waktu *curing* benda uji disamakan untuk setiap variasi benda uji balok beton dan disesuaikan dengan waktu pengecorannya. Dalam penelitian ini, perawatan balok beton dilakukan terus menerus selama 14 hari dari waktu pengecoran. Sedangkan untuk *curing* benda uji silinder dilaksanakan selama 6 hari untuk kemudian diletakkan pada suhu ruangan dan pada hari ke-7 dilakukan pengujian kuat tekan.

#### 3.7.5 Pengujian Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan beton berfungsi untuk memperoleh nilai kekuatan tekan beton pada benda uji silinder dan mendapatkan nilai mutu beton. Pada penelitian ini, pengujian kuat tekan dilaksanakan ketika beton telah berumur 7 hari. Namun dalam pengolahan datanya akan dikonversikan ke dalam 28 hari untuk memperoleh nilai dari mutu beton.

Langkah – langkah dalam melaksanakan uji kuat tekan beton adalah sebagai berikut :



1. Menimbang benda uji untuk dapat mengetahui berat dan kerapatan benda uji sebagai informasi tambahan.
2. Melakukan proses pelapisan (*caping*) pada permukaan benda uji yang tidak rata dengan menggunakan mortar belerang. Hal ini bertujuan supaya tegangan yang diberi oleh mesin penguji (*Compression Test Machine*) bisa terdistribusikan secara keseluruhan pada area permukaan benda uji.
3. Meletakkan sampel benda uji pada mesin penguji dengan tepat.
4. Mesin penguji yang digerakkan dengan pemberian beban yang bertambah secara konstan sampai mencapai nilai maksimum dan benda uji mengalami kehancuran.
5. Mencatat beban ketika benda uji rusak sebagai data beban maksimal yang dapat ditahan oleh benda uji.

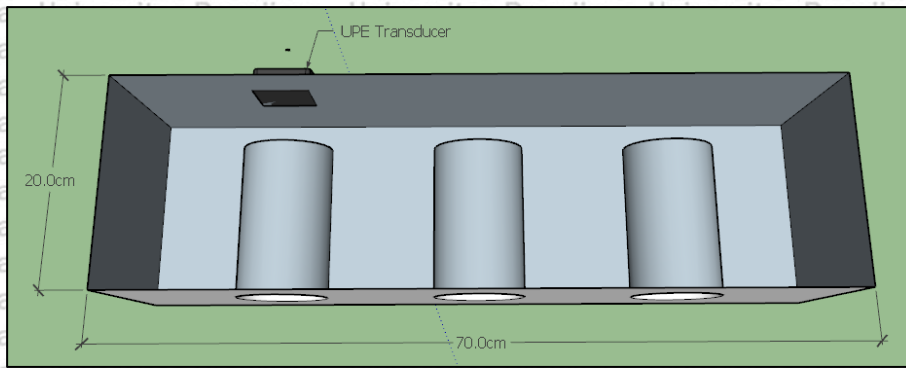
Pengujian kuat tekan juga dilaksanakan pada benda uji balok dengan melakukan metode *non-destructive test*. Pengujian ini menggunakan alat *Rebound Schmidt Hammer*. *Hammer test* dilakukan dengan cara menekan secara tegak lurus pada elemen struktur yang akan diuji. Berfungsi untuk mendapatkan hasil pengukuran yang lebih baik, maka dalam sekali pengujian atau satu titik uji dilakukan 10 pukulan pada luasan sekitar  $5 \times 5$  cm. Pada penelitian ini, diambil sebanyak tiga titik uji dengan permukaan yang halus.

### 3.7.6 Pengujian *Ultrasonic Pulse Echo* (UPE)

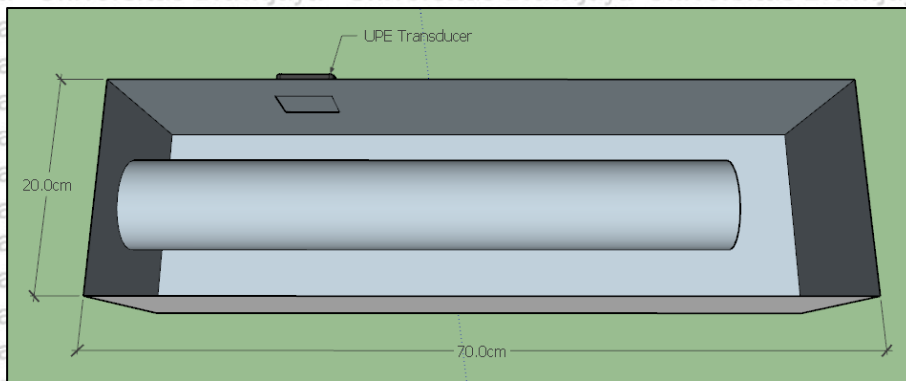
Penelitian ini menggunakan alat UPE Pundit PL-200 dan diuji pada benda uji balok beton yang sudah berumur 28 hari. Pengambilan data didapatkan dengan cara menempatkan transduser pada permukaan atas dari benda uji balok seperti terlihat pada gambar 3.7. Hasil yang diperoleh dari pengujian UPE berupa *velocity*, amplitudo, *waveform* (bentuk gelombang) serta waktu transmisi yang diterima *receiver*.



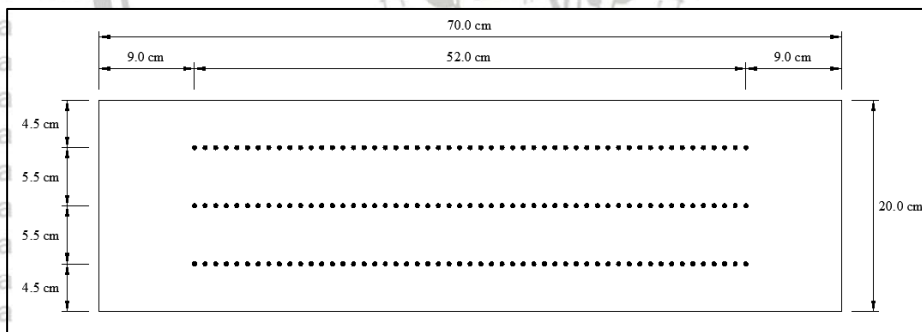
Gambar 3.7 Alat *Ultrasonic Pulse Echo* (UPE)



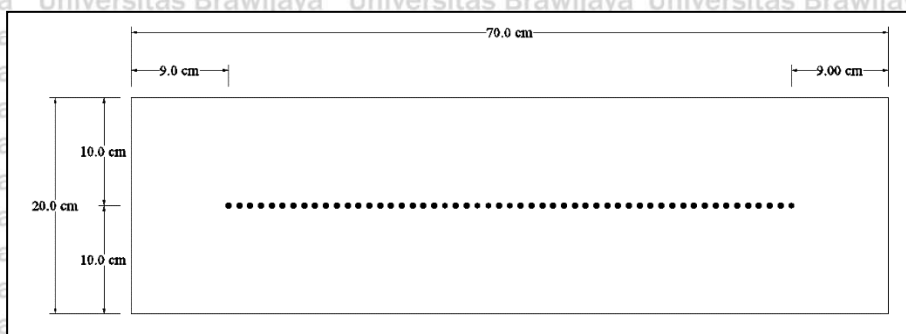
Gambar 3.8 Pengujian UPE pada balok dengan lubang arah transversal



Gambar 3.9 Pengujian UPE pada balok dengan lubang arah longitudinal

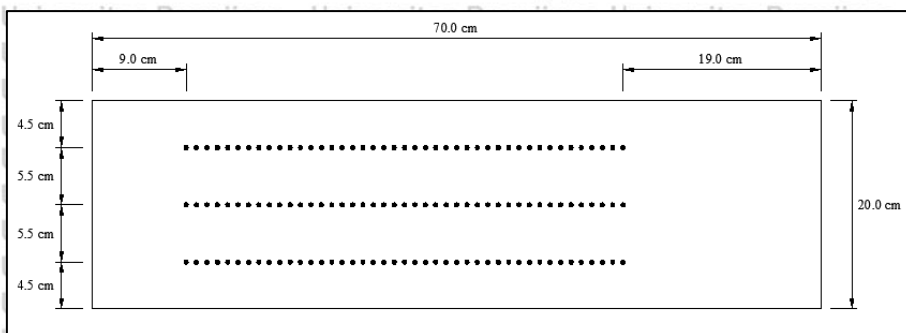


Gambar 3.10 Skema pengujian A scan benda uji balok dengan lubang arah transversal

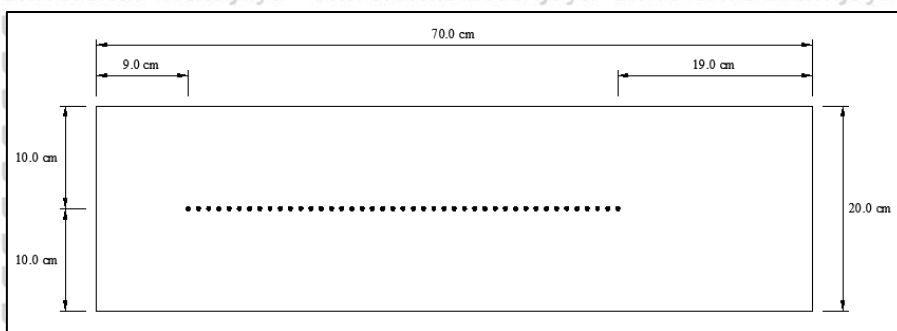


Gambar 3.11 Skema pengujian B scan benda uji balok dengan lubang arah transversal





Gambar 3.12 Skema pengujian A scan benda uji balok dengan lubang arah longitudinal



Gambar 3.13 Skema pengujian B scan benda uji balok dengan lubang arah longitudinal

Beberapa langkah-langkah pengujian UPE antara lain :

1. Tentukan lapisan pengujian beton yang bagus.
2. Beri tanda lokasi berupa titik pengujian.
3. Bersihkan dan ratakan bagian dari lapisan permukaan yang akan diuji.
4. Melakukan pengujian dengan alat UPE.

Pengujian dilaksanakan dengan cara memindahkan transduser ke samping dengan jarak yang sudah ditentukan. Urutan pengujian menyesuaikan titik pengujian yang telah ditentukan sebelumnya dan dimulai dari bagian kiri.

### 3.8 Metode Analisis

#### 3.8.1 Pengumpulan Data

Data-data pada penelitian ini akan diperoleh dari pengujian UPE (*Ultrasonic Pulse Echo*) terhadap benda uji. Hasil pengujian dari masing-masing sampel benda uji akan mendapatkan hasil berupa tampilan pemindaian dan *waveform* (bentuk gelombang) berdasarkan pancaran gelombang ultrasonik yang diterima *receiver*. Kemudian hasil dari pembacaan tersebut dianalisis dengan bantuan aplikasi PL-Link.

Pengujian UPE yang dilakukan berupa metode A-scan dan B-scan, perbedaan dari pengujian ini adalah hasil dari pemindaian (*scanning*). Pengujian A-scan mendapatkan hasil berupa cepat rambat gelombang, waktu transmisi dan pengukuran jarak sesuai dengan titik yang di uji. Pengujian B-scan sendiri mendapatkan hasil berupa *scanning* dari benda uji dalam kondisi potongan sesuai dengan titik pengujian. Pengujian A-scan meninjau hasil pemindaian dan *waveform* dengan meninjau t1, sedangkan untuk pengujian B-scan meninjau hasil pemindaian, *waveform* serta cepat rambat gelombang. Pengujian A-scan dan B-scan dilakukan karena adanya perbedaan dari hasil pemindaian masing-masing pengujian. Hasil B-scan mendapatkan potongan 2 dimensi kondisi dari beton sesuai dengan titik pengujian, sehingga dapat diketahui bagian dalam dari beton. Berbeda dengan pengujian A-scan, pengujian ini dilakukan dengan tujuan untuk mendapatkan data keseluruhan dari benda uji. Pengujian A-scan juga mendapatkan data *waveform* yang lebih jelas jika dibandingkan dengan pengujian B-scan, lebih jelas yang dimaksud adalah adanya data berupa besarnya waktu transmisi awal dan amplitudo.

### 3.8.2 Pengolahan Data

Pada penelitian ini data yang didapatkan berupa pembacaan hasil UPE yang akan dijelaskan melalui analisis gelombang ultrasonik yang ditampilkan dalam format A-scan dan B-scan. Berdasarkan hasil pembacaan A-scan dan B-scan dapat dilihat perbedaan spektrum warna pada benda uji. Pembacaan A-scan memiliki keterangan warna yang menandakan kecepatan dari cepat rambat gelombang yang dipantulkan oleh material. Pembacaan B-scan sendiri memiliki keterangan warna yang menunjukkan tidak seragamnya material pada benda uji yang diteliti. Hasil pembacaan A-scan dan B-scan akan dibandingkan antara beton tanpa air dan beton berisi air.

Hasil pembacaan pada penelitian ini juga meninjau *waveform* (bentuk gelombang) yang terbaca oleh alat pengujian. *Waveform* pada penelitian ini akan meninjau beberapa titik pada benda uji dengan jumlah sampel 6 titik, 3 titik berada di area air dan 3 titik berada perbatasan antara perubahan material beton dan air. Bentuk gelombang yang ditampilkan dari beton tanpa air dan beton berisi air akan dibandingkan untuk menentukan pengaruh adanya intrusi air terhadap gelombang *echo*.



Tabel 3.2 Hasil Pembacaan A scan/ B scan pada beton

Kode Benda Uji	Keterangan	A scan / B scan
A1	Tanpa Air	
	Berisi Air	
B1	Tanpa Air	
	Berisi Air	
C	Beton Normal	

Tabel 3.3 Waveform hasil B scan

Kode Benda Uji	Keterangan	B scan
A1	Titik 1	
	Titik 2	
B1	Titik 1	
	Titik 2	

Tabel 3.4 Waveform hasil A scan

Kode Benda Uji	Keterangan	A scan
A1	Titik 1	
	Titik 2	
	Titik 3	
	Titik 4	
	Titik 5	
	Titik 6	

Tabel 3.5 Hasil rekapitulasi cepat rambat B scan

Kode Benda Uji	Keterangan	Cepat Rambat (m/s)
A1	Tanpa Air	
	B scan	
B1	Berisi Air	
	B scan	
C	Tanpa Air	
	Berisi Air	
C	B scan	
	B scan	

Tabel 3.6 Hasil rekapitulasi data t1 dan A1 untuk waveform

Kode Benda Uji	Keterangan	Waktu		Amplitudo (%)	
		T1	Tmaks	A1	Amaks
A1	Titik 1				
	Titik 2				
	Titik 3				
	Titik 4				
	Titik 5				
	Titik 6				

### 3.9 Hipotesis

Berdasarkan hasil tinjauan pustaka yang telah dikumpulkan, maka pada penelitian ini diharapkan akan mendapatkan hasil sebagai berikut :

1. Adanya impedansi akustik memberikan pengaruh pada beton berlubang dengan beton yang memiliki intrusi air terhadap pengujian *Ultrasonic Pulse Echo* (UPE).
2. Adanya pengaruh terhadap *waveform* pada beton yang memiliki intrusi air berupa amplitudo yang lebih rendah jika dibandingkan dengan beton berlubang.
3. Beton yang mengalami intrusi air memiliki cepat rambat yang lebih tinggi dikarenakan terdapat medium air jika dibandingkan dengan beton berlubang.



## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Pembuatan Benda Uji

##### 4.1.1 Perencanaan Pembuatan Benda Uji

Benda uji utama pada penelitian ini merupakan balok sedangkan benda uji silinder digunakan untuk uji kuat tekan. Benda uji balok yang digunakan pada penelitian ini terdapat 3 jenis yaitu beton normal, beton dengan lubang arah transversal dan beton dengan lubang arah longitudinal. Benda uji beton berlubang memiliki 3 variasi lubang yaitu lubang dengan diameter 2 inch, 3 inch dan 4 inch. Benda uji dengan bentuk balok memiliki dimensi 20 × 20 × 70 cm, sedangkan untuk benda uji silinder memiliki dimensi 15 × 30 cm. Perencanaan pembuatan sampel benda uji pada penelitian ini menggunakan proporsi campuran 1 : 1,6 : 2,6 dengan keterangan semen : agregat halus : agregat kasar. Hasil dari perhitungan proporsi keperluan bahan benda uji dapat dilihat pada tabel 4.1 berikut.

Tabel 4.1 Kebutuhan material untuk pembuatan benda uji

Benda Uji	Kode	Kebutuhan Material			
		Semen (kg)	Pasir (kg)	Kerikil (kg)	Air (kg)
Beton normal	A	10.96	4.40	17.26	28.19
Beton dengan lubang arah transversal	B	32.88	13.19	51.79	84.57
Beton dengan lubang arah longitudinal	C	32.88	13.19	51.79	84.57
Jumlah		76.72	30.78	120.84	197.33

##### 4.1.2 Proses Pembuatan Benda Uji

Pembuatan benda uji pada penelitian ini dilaksanakan dengan menggunakan alat *concrete mixer*. Persiapan yang dilakukan sebelum melaksanakan pengecoran berupa memberikan oli pada cetakan silinder dan balok, hal ini bertujuan agar cetakan mudah dilepas ketika benda uji sudah kering. Persiapan selanjutnya berupa menimbang setiap kebutuhan material sesuai dengan perencanaan yang telah dibuat. Kemudian masukkan material yang sudah disiapkan ke dalam *concrete mixer* dan tunggu sampai tercampur menjadi satu, lalu melakukan uji slump agar mengetahui kelecakan dari beton tersebut.



Slump yang digunakan pada penelitian ini berkisar antara 6 – 18 cm. Slump beton yang sudah memenuhi syarat batas akan dituangkan ke dalam cetakan silinder dan balok. Hasil slump dalam pembuatan benda uji dapat dilihat pada tabel di bawah.

Tabel 4.2 Hasil nilai slump pada pembuatan benda uji

No.	Benda Uji	Nilai Slump (cm)
1	BNB	12.5
2	PTA	11.8
3	PTB & PTC	16
4	PLA	14.7
5	PLB & PLC	13

Pada waktu beton dituangkan ke dalam cetakan, dialaksnaakan pemadatan dengan cara menusuk-nusuk campuran beton atau menggunakan vibrator agar campuran beton merata dan seragam.



(a)



(b)

Gambar 4.1 Pembuatan benda uji. (a) uji *slump*, (b) pemadatan dengan *vibrator*



Gambar 4.2 Beton pada cetakan silinder





Gambar 4.3 Beton pada bekisting balok

Pembuatan benda uji beton dengan lubang arah transversal dan longitudinal dilaksanakan dengan menuangkan campuran beton ke bekisting yang sudah diberi pipa sesuai dengan rancangan penelitian. Beton yang sudah dituangkan ke dalam bekisting ditunggu kurang lebih 5 jam sampai beton terlihat kering, kemudian pipa yang terdapat di dalam beton dilepaskan dengan cara ditarik.



Gambar 4.4 Pembuatan benda uji sebelum dan sesudah beton dituangkan

#### 4.1.3 Proses Curing

*Curing* bertujuan untuk menghindari keretakan awal pada benda uji beton yang disebabkan karena panas hidrasi tinggi. *Curing* dilaksanakan setelah bekisting dilepaskan dari beton. *Curing* dalam penelitian ini dilakukan sampai beton siap untuk diuji pada umur 28 hari. Pelaksanaan *curing* terhadap beton balok dilakukan dengan cara menutupi benda uji dengan kain yang sudah dibasahi, sedangkan untuk sampel benda uji silinder dilaksanakan dengan cara merendam beton silinder ke dalam air sampai siap untuk diuji CTM.



#### 4.2 Pengujian Kuat Tekan Menggunakan *Compression Test Machine*

Pengujian kuat tekan beton dengan menggunakan *Compression Test Machine* (CTM) dilaksanakan terhadap sampel benda uji yang berbentuk silinder. Pengujian CTM bertujuan untuk mengetahui kekuatan maksimum yang bisa diterima oleh sampel beton silinder, sehingga mendapatkan hasil dari kuat tekan ( $f'_c$ ) beton tersebut. Pengujian dilaksanakan terhadap beton yang memiliki umur di bawah 28 hari, sehingga diperlukan perhitungan tambahan berupa faktor koreksi kuat tekan beton tersebut. Perhitungan kuat tekan ( $f'_c$ ) benda uji beton silinder dapat menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$f'_c = \frac{P}{A}$$

Keterangan :

$f'_c$  = kuat tekan beton (MPa)

P = beban maksimum (N)

A = luas area bidang tekan ( $\text{mm}^2$ )

Contoh perhitungan :

Benda uji : Balok beton normal tanpa lubang (diuji umur 15 hari)

Diameter (D) : 15 cm

Beban maksimum : 425 kN = 425000 N = 42500 kg

Luas (A) :  $0.25 \times \pi \times D^2 = 0.25 \times \pi \times 15^2 = 176.71 \text{ cm}^2 = 17671 \text{ mm}^2$

Hasil kuat tekan beton ( $f'_c$ ) umur 15 hari :  $42500/17671 = 240.5 \text{ kg/mm}^2$

Kuat tekan beton ( $f'_c$ ) pada umur 28 hari :  $240.5 \times 0.89 = 214.05 \text{ kg/mm}^2$

= 26.5 MPa



(a)



(b)

Gambar 4.5 (a) *Capping* benda uji silinder, (b) Pengujian kuat tekan menggunakan CTM

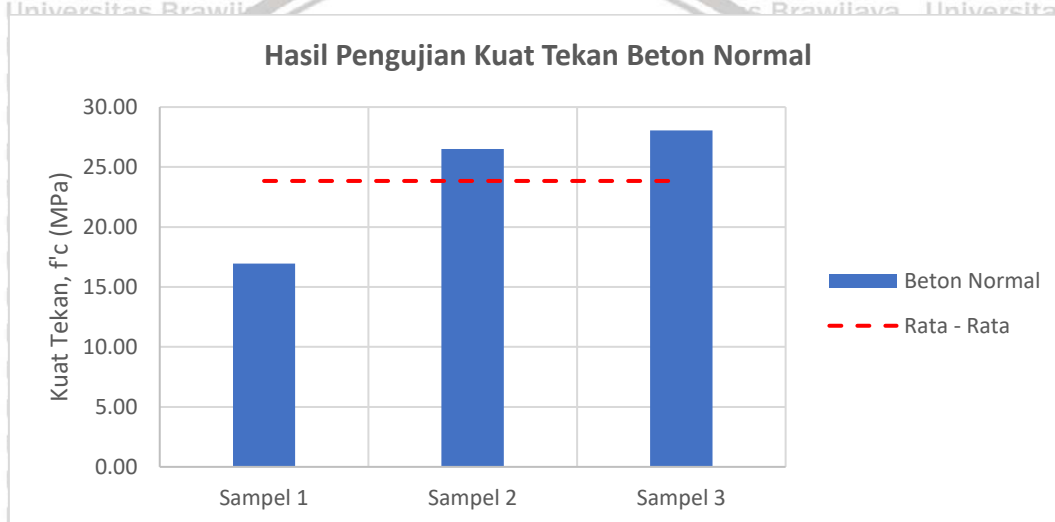


#### 4.2.1 Beton Normal

Pengujian kuat tekan sampel silinder beton normal memiliki berbagai macam variasi kuat tekan. Hasil dari penelitian memiliki nilai yang cukup signifikan di antara ke tiga benda uji. Hasil *compressive test* untuk kuat tekan beton normal sebagai berikut :

Tabel 4.3 Hasil pengujian kuat tekan silinder beton normal

Benda Uji	Umur	Beban Maksimum	$f'_c$ (15 hari)	$f'_c$ (28 hari)	$f'_c$ Rata – Rata
		kg	kg/cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup> MPa	Rata (MPa)
Beton Normal	15	27200	153.92	172.94	16.96
	15	42500	240.50	270.23	26.50
	15	45000	254.65	286.12	28.06



Gambar 4.6 Grafik hasil pengujian kuat tekan beton normal

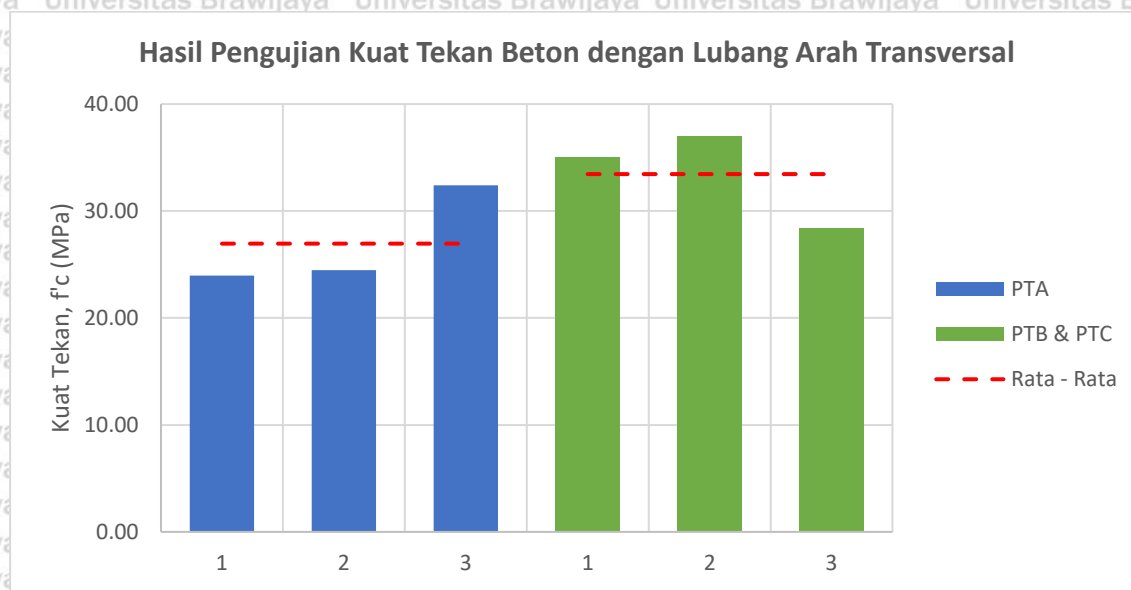
Hasil dari pengujian kuat tekan beton normal menggunakan *compressive test* mendapatkan hasil yang bervariasi. Kuat tekan beton silinder paling tinggi pada umur 28 hari didapatkan sebesar 28.06 MPa, sedangkan nilai kuat tekan beton paling rendah didapatkan sebesar 16.96 MPa. Rata – rata yang dihasilkan dari 3 beton silinder pada benda uji beton normal sebesar 23.84 MPa.

#### 4.2.2 Beton dengan Lubang Arah Transversal

Pengujian kuat tekan sampel silinder beton dengan lubang arah transversal memiliki berbagai macam variasi kuat tekan. Hasil penelitian memiliki nilai yang cukup signifikan di antara ke tiga benda uji beton yang dibuat. Hasil *compressive test* untuk kuat tekan beton dengan lubang arah transversal sebagai berikut :

Tabel 4.4 Hasil pengujian kuat tekan silinder beton dengan lubang arah transversal

Benda Uji	Beban Maksimum	f'c (pengujian)		f'c (28 hari)		f'c Rata – Rata (MPa)
	kg	kg/cm <sup>2</sup>		kg/cm <sup>2</sup> MPa		
PTA	38000	215.04		244.36		23.96
	38800	219.56		249.50		24.47
	51400	290.86		330.53		32.41
PTB & PTC	51300	290.30		356.63		34.97
	54300	307.28		377.49		37.02
	41600	235.41		289.20		28.36



Gambar 4.7 Grafik hasil pengujian kuat tekan beton dengan lubang arah transversal

Hasil dari pengujian kuat tekan beton dengan lubang arah transversal menggunakan *compressive test* mendapatkan hasil yang bervariasi. Benda uji beton dengan lubang arah transversal memiliki 3 jenis benda uji balok dengan pengecoran sebanyak 2 kali. Pengecoran benda uji PTA terpisah dengan benda uji PTB & PTC, hal ini dikarenakan keterbatasan mesin pengaduk beton dalam pelaksanaan, oleh karena itu benda uji PTB & PTC memiliki kuat tekan beton silinder yang sama.

Beton silinder PTA memiliki 3 benda uji yang mana kuat tekan paling tinggi sebesar 32.41 MPa, sedangkan kuat tekan paling rendah sebesar 23.96 MPa. Rata – rata yang didapatkan dari beton silinder PTA sebesar 26.95 MPa. Beton silinder PTB & PTC juga memiliki 3 benda uji, yang mana kuat tekan paling tinggi sebesar 37.02 MPa, sedangkan kuat tekan paling rendah sebesar 28.36 MPa. Rata – rata yang didapatkan dari beton silinder PTB & PTC sebesar 33.45 MPa.

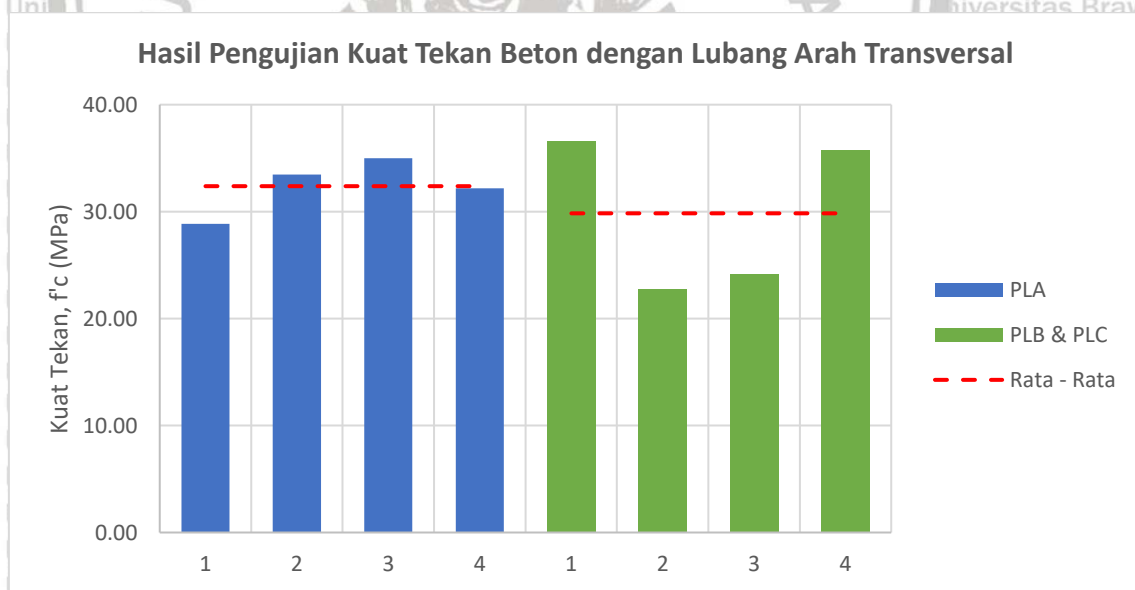


#### 4.2.3 Beton dengan Lubang Arah Longitudinal

Pengujian kuat tekan sampel silinder beton dengan lubang arah longitudinal memiliki berbagai macam variasi kuat tekan. Hasil penelitian memiliki nilai yang cukup signifikan di antara ke tiga benda uji beton yang dibuat. Hasil *compressive test* untuk kuat tekan beton dengan lubang arah longitudinal sebagai berikut :

Tabel 4.5 Hasil pengujian kuat tekan silinder beton dengan lubang arah longitudinal

Benda Uji	Beban Maksimum	f <sub>c</sub> (pengujian)	f <sub>c</sub> (28 hari)	f <sub>c</sub> Rata – Rata (MPa)
	kg	kg/cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup> MPa	
PLA	33800	191.27	294.26	28.86
	39200	221.83	341.27	33.47
	41000	232.01	356.94	35.00
	37700	213.34	328.21	32.19
	42900	242.76	373.48	36.63
PLB & PLC	26700	151.09	232.45	22.80
	28300	160.15	246.38	24.16
	41900	237.11	364.78	35.77



Gambar 4.8 Hasil pengujian kuat tekan beton dengan lubang arah longitudinal

Hasil dari pengujian kuat tekan beton dengan lubang arah longitudinal menggunakan *compressive test* mendapatkan hasil yang bervariasi. Benda uji beton dengan lubang arah longitudinal memiliki 3 jenis benda uji balok dengan pengecoran sebanyak 2 kali.

Pengecoran benda uji PLA terpisah dengan benda uji PLB & PLC, hal ini dikarenakan keterbatasan mesin pengaduk beton dalam pelaksanaan, oleh karena itu benda uji PLB & PLC memiliki kuat tekan beton silinder yang sama.

Beton silinder PLA memiliki 4 benda uji yang mana kuat tekan paling tinggi sebesar 35 MPa, sedangkan kuat tekan paling rendah sebesar 28.86 MPa. Rata – rata yang didapatkan dari beton silinder PLA sebesar 32.38 MPa. Beton silinder PLB & PLC juga memiliki 4 benda uji, yang mana kuat tekan paling tinggi sebesar 36.63 MPa, sedangkan kuat tekan paling rendah sebesar 22.8 MPa. Rata – rata yang didapatkan dari beton silinder PLB & PLC sebesar 29.84 MPa.

Hasil dari rata – rata kuat tekan beton silinder tidak sepenuhnya dapat digunakan sebagai acuan kuat tekan beton balok sebenarnya, hal ini dikarenakan banyak faktor yang dapat mempengaruhi kuat tekan beton yang satu dengan yang lainnya meskipun dalam satu pengecoran yang sama.

#### 4.3 Pengujian Kuat Tekan Menggunakan Hammer Test

*Hammer test* dijalankan pada seluruh benda uji balok pada penelitian ini. *Hammer test* bertujuan untuk mengetahui hasil dalam bentuk angka pantul (*rebound hammer*). Angka pantul didapatkan dari proses tumbukan antara permukaan beton dengan ujung *plunger*, sehingga mendapatkan pantulan. Hasil pantulan tersebut dapat diketahui oleh *rebound hammer* untuk memprediksi kekerasan beton.



Gambar 4.9 Pengujian kuat tekan menggunakan metode *Hammer Test*

Pengujian kuat tekan beton menggunakan metode *Hammer Test* memiliki beberapa variasi hasil kuat tekan dari setiap sampel benda uji. Berikut merupakan hasil dari *Hammer Test* yang menggunakan bantuan aplikasi Hammer Link sebagai berikut :



Tabel 4.6 Hasil pengujian kuat tekan beton dengan metode *Hammer Test*.

Benda Uji	Kuat Tekan $f_c$ (MPa)	$f_c$ Rata – Rata (MPa)
BNB	25	25.5
	26	
PTA	27	27
PTB	25.5	25.5
PTC	30	29
	28	
PLA	27.5	27.5
	27.5	
PLB	25.5	26.83
	25.5	
	29.5	
PLC	25	24.75
	24.5	

Pengujian kuat tekan menggunakan metode hammer test mendapatkan hasil kuat tekan paling tinggi sebesar 29 MPa pada benda uji beton PTC, sedangkan kuat tekan beton paling rendah sebesar 24.75 MPa pada benda uji beton PLC. Kuat tekan yang didapatkan dari pengujian CTM dan pengujian hammer test memiliki hasil kuat tekan yang cukup berbeda, hal ini dikarenakan pengujian CTM dilakukan pada beton silinder yang merupakan sampel dari pengecoran benda uji, sehingga kemungkinan terjadi perubahan kuat tekan pada benda uji silinder dan benda uji balok dapat terjadi. Hammer test sendiri merupakan pengujian NDT yang dilakukan terhadap benda uji balok, sehingga hasil kuat tekan yang digunakan sebagai acuan kuat tekan balok merupakan hasil dari pengujian hammer test.

#### 4.4 Pengujian *Ultrasonic Pulse Echo* (UPE)

Pengujian UPE dilaksanakan pada seluruh benda uji balok, yang mana pengujian ini dilakukan sebanyak satu kali. Pengambilan data pada benda uji dilakukan dengan menempatkan alat UPE pada permukaan benda uji balok. Titik pengujian pada benda uji balok dengan lubang arah transversal dan longitudinal memiliki jumlah titik yang berbeda.



Benda uji beton dengan lubang arah transversal memiliki jumlah titik sebanyak 53 titik untuk pengujian B – scan, sedangkan untuk pengujian A – scan memiliki jumlah titik sebanyak 159 titik. Benda uji beton dengan lubang arah longitudinal dengan pengujian B – scan memiliki jumlah titik sebanyak 43 titik, sedangkan untuk pengujian A scan memiliki jumlah titik sebanyak 129 titik.

Pengujian B – scan diambil 2 sampel titik, sedangkan pengujian A – scan diambil 6 sampel titik untuk meninjau *waveform* dari benda uji balok. Penentuan titik sampel yang akan di tinjau pada hasil pembacaan B – scan dan A – scan akan dilakukan secara acak.



(a)



(b)

Gambar 4.10 Pengujian UPE. (a) kalibrasi alat, (b) pengujian beton dengan alat UPE

Pengujian *Ultrasonic Pulse Echo* (UPE) dijalankan menggunakan alat PUNDIT PL-200 dari PROCEQ kemudian hasil pembacaan alat tersebut akan dianalisis menggunakan aplikasi PL-Link. Hasil yang diketahui dari pengujian UPE berupa *velocity* (cepat rambat), bentuk gelombang (*waveform*), waktu transmisi serta amplitudo. Gelombang sekunder yang didapatkan pada pengujian ini merupakan gelombang sekunder (s-wave).

S-wave atau gelombang transversal memiliki cepat rambat yang lebih lambat bila dibandingkan dengan p-wave dan hanya dapat merambat pada medium padat saja. Pada gelombang sekunder dapat terjadi oleh tegangan geser karena partikel bergerak secara tegak lurus terhadap arah perambatannya, sehingga perambatan dari gelombang ini dapat dibagi menjadi pergerakan vertikal dan horizontal.

#### 4.5 Analisis Impedansi Akustik

Impedansi akustik dapat didefinisikan sebagai kemampuan batuan untuk melewati gelombang seismik yang melaluinya. Impedansi akustik didapatkan dari perkalian densitas dan cepat rambat gelombang terhadap material yang ditinjau. Persamaan dari impedansi akustik dapat dilihat di bawah ini.



$$Z = \rho \times v$$

Dimana :

- $Z$  = impedansi akustik dalam  $\text{kg/m}^2\text{s}$  atau rayl
- $\rho$  = densitas dalam  $\text{kg/m}^3$
- $v$  = kecepatan suara dalam  $\text{m/s}$

Ketika gelombang *echo* melewati dua material yang berbeda, gelombang tersebut akan dipantulkan kembali dan sebagian gelombang akan diteruskan. Gelombang *echo* yang dipantulkan dan diteruskan dapat dihitung berdasarkan impedansi akustik dari kedua material tersebut. Persentase gelombang yang dipantulkan dapat dihitung menggunakan persamaan di bawah ini.

$$R = \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2$$

Dimana :

- $Z_1$  = impedansi akustik lapisan pertama
- $Z_2$  = impedansi akustik lapisan kedua

Berikut merupakan nilai perkiraan impedansi untuk beberapa material yang dapat digunakan sebagai acuan.

Tabel 4.7 Impedansi akustik pada material

Acoustic impedances at  $p_0 = 10^5 \text{ bar}$  and  $T = 25^\circ \text{ C}$  [2]

Medium	Acoustic impedance in $\frac{\text{kg}}{\text{m}^2\cdot\text{s}}$	Speed of sound (P-wave) in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
Construction steel	$46 \cdot 10^6$	6000
Water (distilled)	$1.5 \cdot 10^6$	1500
Concrete	$(5.4 - 12.1) \cdot 10^6$	3000 – 4830
Air	427	344

Sumber : [Ultrasound \(Overview\) - ZFP - TUM Wiki](#)

Pada penelitian ini menggunakan benda uji beton dengan lubang tanpa air dan beton berisi air. Lapisan kedua dari beton dengan kondisi lubang tanpa air adalah udara, sedangkan untuk beton berisi air adalah air. Impedansi akustik beton berkisar antara  $(5.4 - 12.1) \times 10^6$ , sehingga impedansi akustik beton yang digunakan adalah  $8,000,000 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .

Besarnya pantulan yang dihasilkan dari beton dengan lubang tanpa air dan berisi air dapat dilihat dari perhitungan di bawah ini.

- Beton dengan lubang tanpa air ( $Z_1 = \text{beton}$ ,  $Z_2 = \text{udara}$ )

$$R = \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 = \left( \frac{427 - 8000000}{427 + 8000000} \right)^2 = 0.9998$$

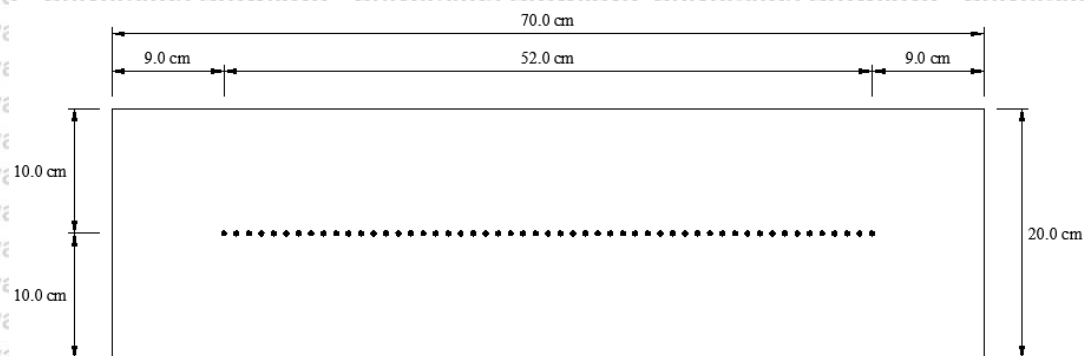
- Beton dengan lubang berisi air ( $Z_1 = \text{beton}$ ,  $Z_2 = \text{air}$ )

$$R = \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 = \left( \frac{1500000 - 8000000}{1500000 + 8000000} \right)^2 = 0.468$$

Berdasarkan hasil perhitungan, persentase gelombang yang dipantulkan dari beton dengan lubang tanpa air sebesar 100% dan tidak ada gelombang yang diteruskan. Persentase gelombang yang dipantulkan dari beton dengan lubang berisi air sebesar 46,8% dan gelombang yang diteruskan sebesar 53,2%. Kesimpulan dari perhitungan impedansi akustik adalah masih adanya gelombang yang dapat merambat pada area lubang untuk benda uji beton dengan lubang berisi air, sedangkan untuk gelombang pada benda uji dengan lubang tanpa air dipantulkan secara penuh.

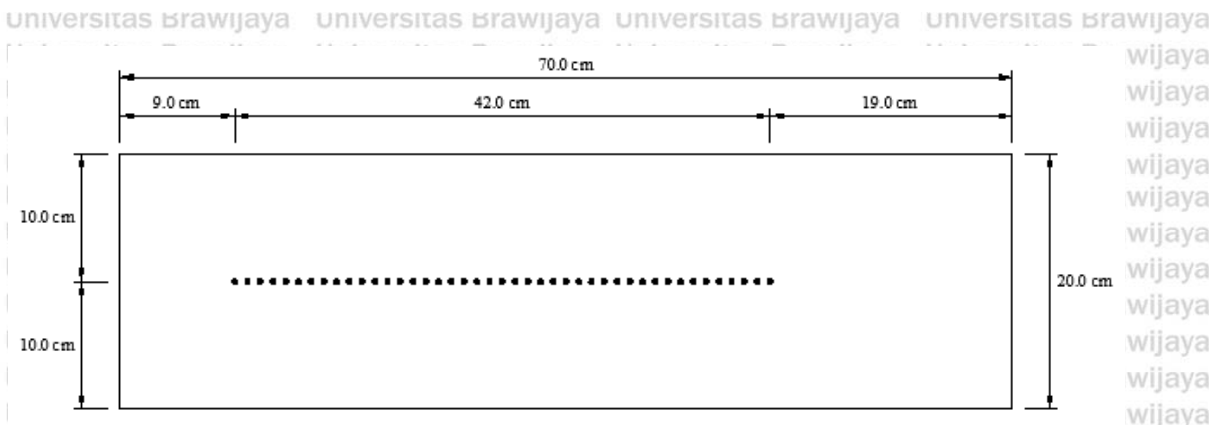
#### 4.6 Hasil Pengujian UPE dengan Metode B – Scan

Pengujian b-scan dilakukan terhadap beton normal dan beton dengan lubang tanpa berisi air dan berisi air. Skema pengambilan titik pengujian pada beton normal dan beton dengan lubang arah transversal memiliki jumlah titik yang sama sebanyak 53 titik sampel, sedangkan untuk beton dengan lubang arah longitudinal memiliki jumlah titik sebanyak 43 titik sampel. Perbedaan ini dikarenakan beton dengan lubang arah longitudinal memiliki lubang sepanjang 50 cm dan dalam pengujian ini dilakukan pada area lubang saja. Berikut merupakan skema pengambilan titik pengujian UPE dengan metode b-scan.

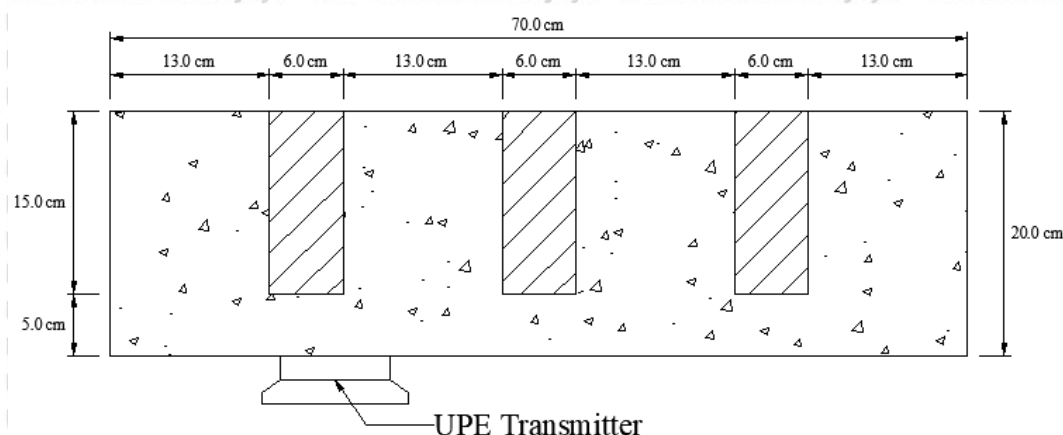


Gambar 4.11 Titik pengujian b-scan beton normal dan beton dengan lubang arah transversal

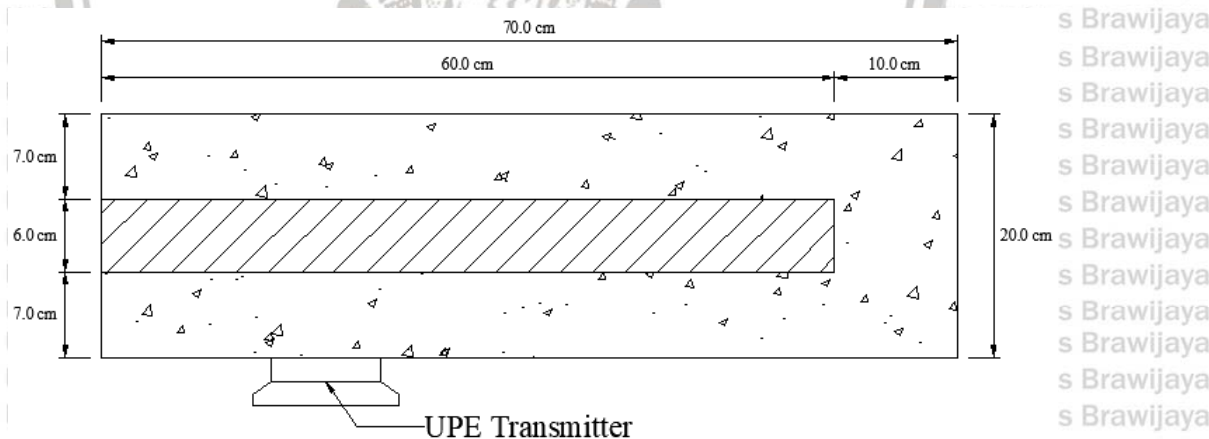




Gambar 4.12 titik pengujian b-scan beton dengan lubang arah longitudinal



Gambar 4.13 Skema pengujian UPE pada beton dengan lubang arah transversal

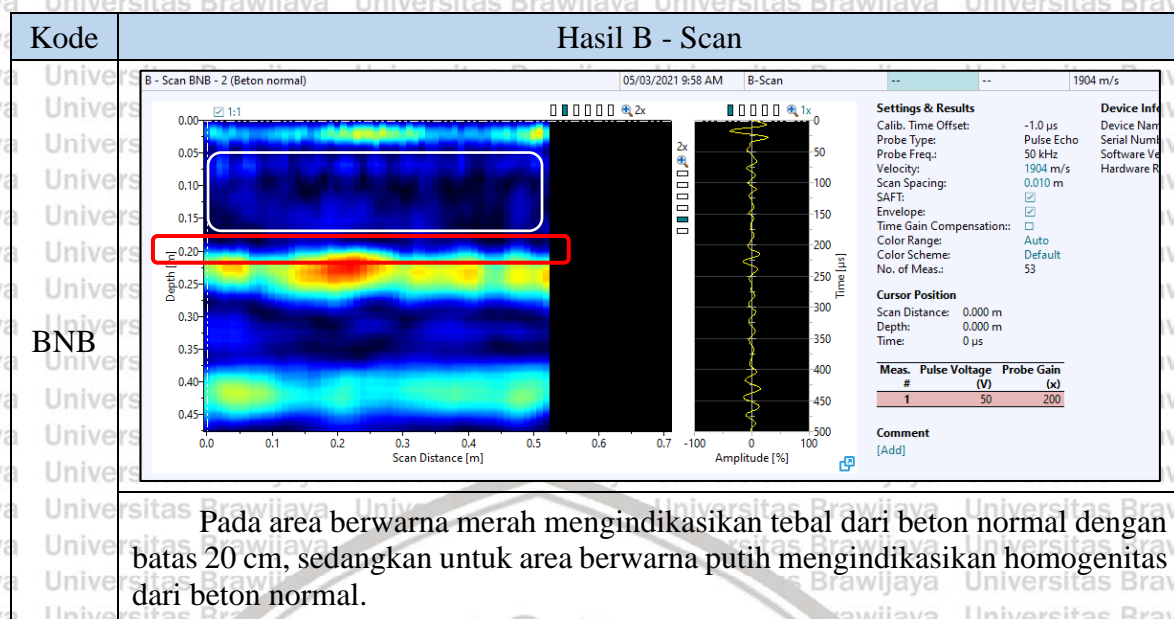


Gambar 4.14 Skema pengujian UPE pada beton dengan lubang arah longitudinal

#### 4.6.1 Beton Normal

Pengujian UPE (*Ultrasonic Pulse Echo*) dengan metode b-scan terhadap beton normal dilakukan dengan jumlah titik sebanyak 53 titik (jarak 52 cm). Pengujian dengan metode b-scan menghasilkan potongan 2 dimensi berupa pemindaian (*scanning*) benda uji secara tegak lurus dengan permukaan yang diuji. Hasil pengujian UPE pada beton normal bisa dilihat pada gambar di bawah ini.

Tabel 4.8 Hasil B – scan beton normal



Pada hasil b-scan beton normal didapatkan nilai cepat rambat sebesar 1904 m/s. Hasil b-scan menampilkan benda uji beton sedalam 20 cm, hal ini menunjukkan hasil yang cukup bagus dan tidak terlihat adanya indikasi rongga atau diskontinuitas yang ditandai dengan tidak adanya perubahan spektrum warna yang signifikan di dalam beton. Beton normal pada penelitian ini bertujuan sebagai kontrol analisis dengan benda uji yang lainnya. Kontrol yang dimaksud adalah kondisi balok yang tidak memiliki pengaruh terhadap variasi bentuk seperti beton dengan lubang.

#### 4.6.2 Beton dengan Lubang Arah Transversal dan Longitudinal

Pengujian UPE (*Ultrasonic Pulse Echo*) dengan metode b-scan terhadap beton dengan lubang arah transversal dilakukan dengan jumlah titik sebanyak 53 titik (jarak 52 cm), sedangkan untuk lubang dengan arah longitudinal memiliki jumlah titik sebanyak 43 titik (jarak 42 cm). Pengujian yang dilakukan terhadap benda uji ini dilakukan dengan 2 kondisi, kondisi yang dimaksud berupa beton dengan lubang tanpa air dan lubang berisi air. Analisis yang dilakukan pada pengujian b-scan adalah membandingkan hasil *scanning*, *waveform* serta *velocity* antara benda uji dengan lubang tanpa air dan berisi air.

##### 4.6.2.1 Hasil *Scanning* (Pemindaian) Lubang Tanpa Air dan Berisi Air

Analisis yang dilakukan berupa membandingkan hasil *scanning* (pemindaian) dari metode UPE terhadap beton dengan lubang tanpa air dan berisi air. Hasil pengujian UPE pada beton dengan lubang arah transversal dapat dilihat pada gambar di bawah.

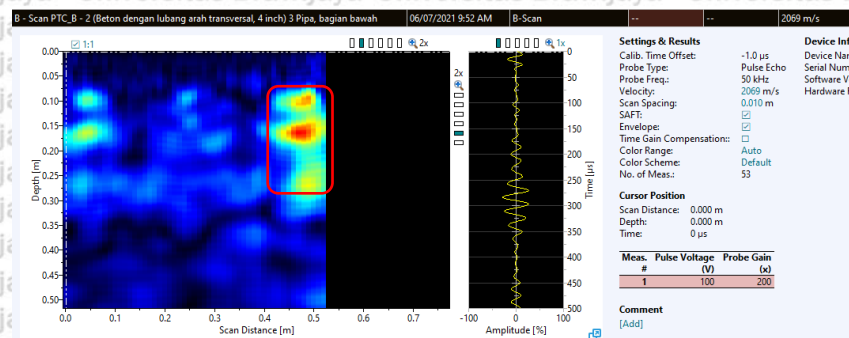


Tabel 4.9 Hasil pemindaian b-scan beton dengan lubang tanpa air dan berisi air

Kode	Kondisi Beton	Hasil B - Scan
	Lubang tanpa air	
PTA	Lubang berisi air	
<p>Hasil dari pengujian dapat dilihat dengan adanya warna yang sedikit lebih kontras pada benda uji beton tanpa air dibandingkan beton berisi air karena terdapat air yang dapat menyalurkan gelombang.</p>		
	Lubang tanpa air	
PTB	Lubang berisi air	

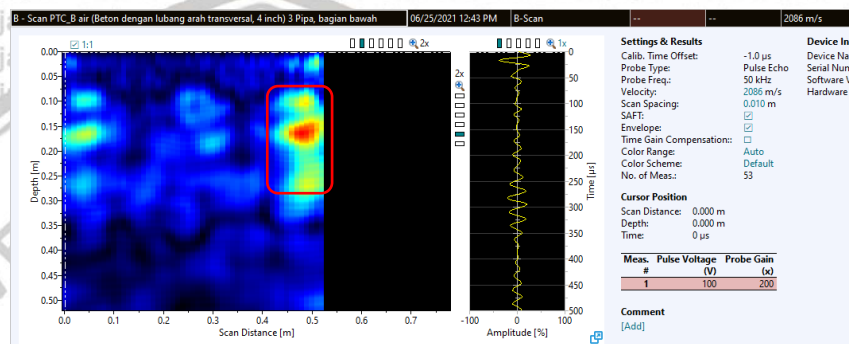
Hasil dari pengujian dapat dilihat dengan adanya warna yang sedikit lebih kontras pada benda uji beton tanpa air dibandingkan beton berisi air karena terdapat air yang dapat menyalurkan gelombang.

Lubang  
tanpa  
air



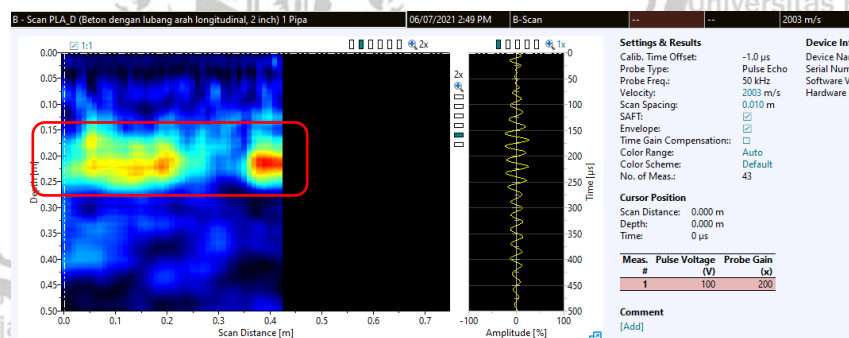
PTC

Lubang  
berisi  
air



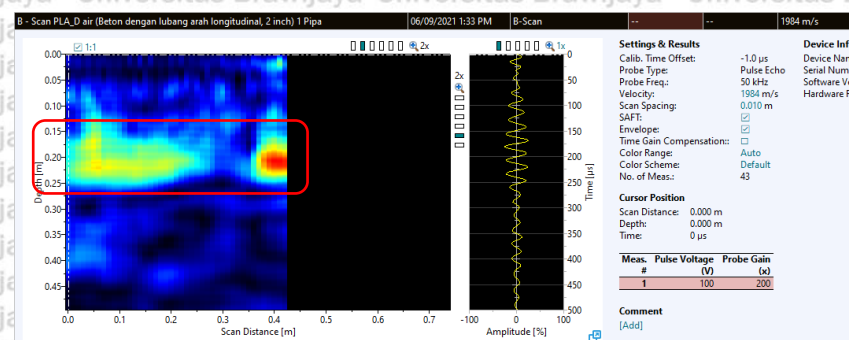
Hasil dari pengujian dapat dilihat dengan adanya warna yang sedikit lebih kontras pada benda uji beton tanpa air dibandingkan beton berisi air karena terdapat air yang dapat menyalurkan gelombang.

Lubang  
tanpa  
air



PLA

Lubang  
berisi  
air





Hasil dari pengujian dapat dilihat dengan adanya warna yang sedikit lebih kontras pada benda uji beton tanpa air dibandingkan beton berisi air karena terdapat air yang dapat menyalurkan gelombang.

Lubang  
tanpa  
air

PLB

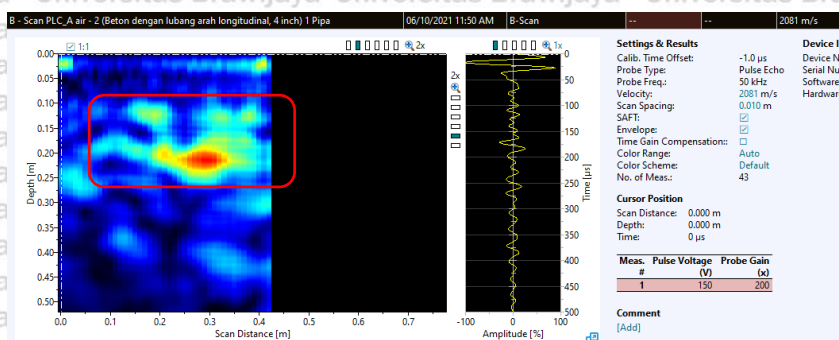
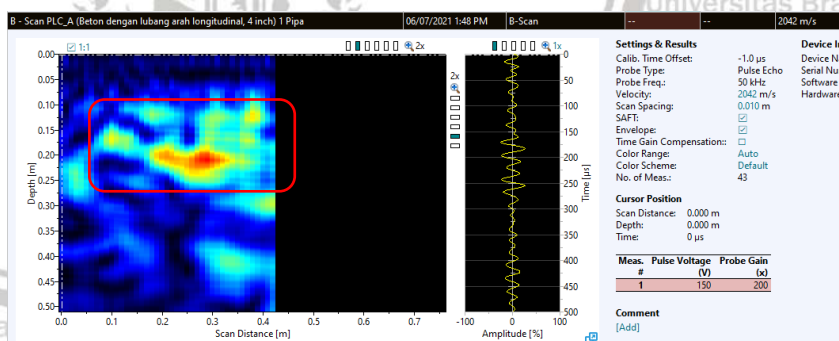
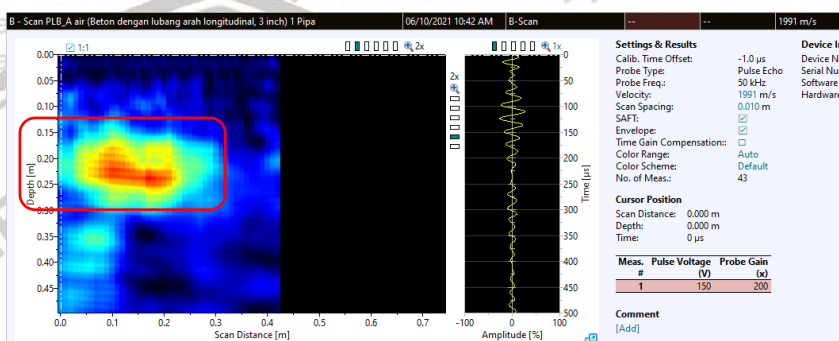
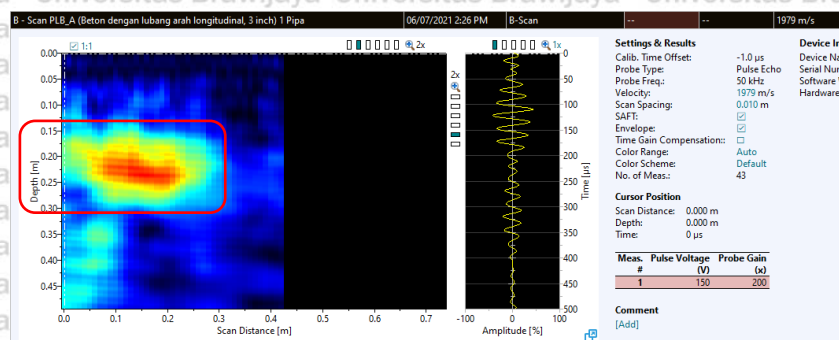
Lubang  
berisi  
air

Hasil dari pengujian dapat dilihat dengan adanya warna yang sedikit lebih kontras pada benda uji beton tanpa air dibandingkan beton berisi air karena terdapat air yang dapat menyalurkan gelombang.

Lubang  
tanpa  
air

PLC

Lubang  
berisi  
air



<p>Hasil dari pengujian dapat dilihat dengan adanya warna yang sedikit lebih kontras pada benda uji beton tanpa air dibandingkan beton berisi air karena terdapat air yang dapat menyalurkan gelombang.</p>
---

Hasil pemindaian metode b-scan terhadap beton dengan lubang tanpa air dan lubang berisi air cukup sulit untuk membedakan secara visual. Kondisi yang sedikit berbeda dari beton dengan lubang berisi air adalah pengaruh warna yang sedikit pudar dari pada beton dengan lubang tanpa air. Pudar yang dimaksud adalah lokasi lubang yang berisi air memiliki warna yang dapat menyatu dengan area sekitarnya yang menandakan homogenitas dari material air. Kepudaran warna pada area lubang berisi air terjadi karena gelombang *echo* masih dapat melalui material air sesuai dengan perhitungan impedansi sebelumnya. Berbeda dengan benda uji beton dengan lubang tanpa air yang tidak dapat ditinjau lebih lanjut ketika sudah mencapai area lubang karena gelombang *echo* sudah tidak ditransmisikan setelah menemukan udara. Hal tersebut dapat terjadi dikarenakan impedansi akustik, adanya material air menyebabkan impedansi akustik yang tidak setinggi beton berisi udara. Beton dengan lubang tanpa air hanya berisikan udara sehingga gelombang yang ditransmisikan akan dipantulkan sebesar 100%, sedangkan untuk material air masih terdapat gelombang yang diteruskan walaupun tidak sebesar beton normal.

Kesimpulan yang dapat diambil dari pengujian UPE dengan metode b-scan adalah adanya kepudaran warna terhadap beton dengan intrusi air terhadap hasil *scanning* (pemindaian) yang cukup sulit untuk dilihat secara visual.

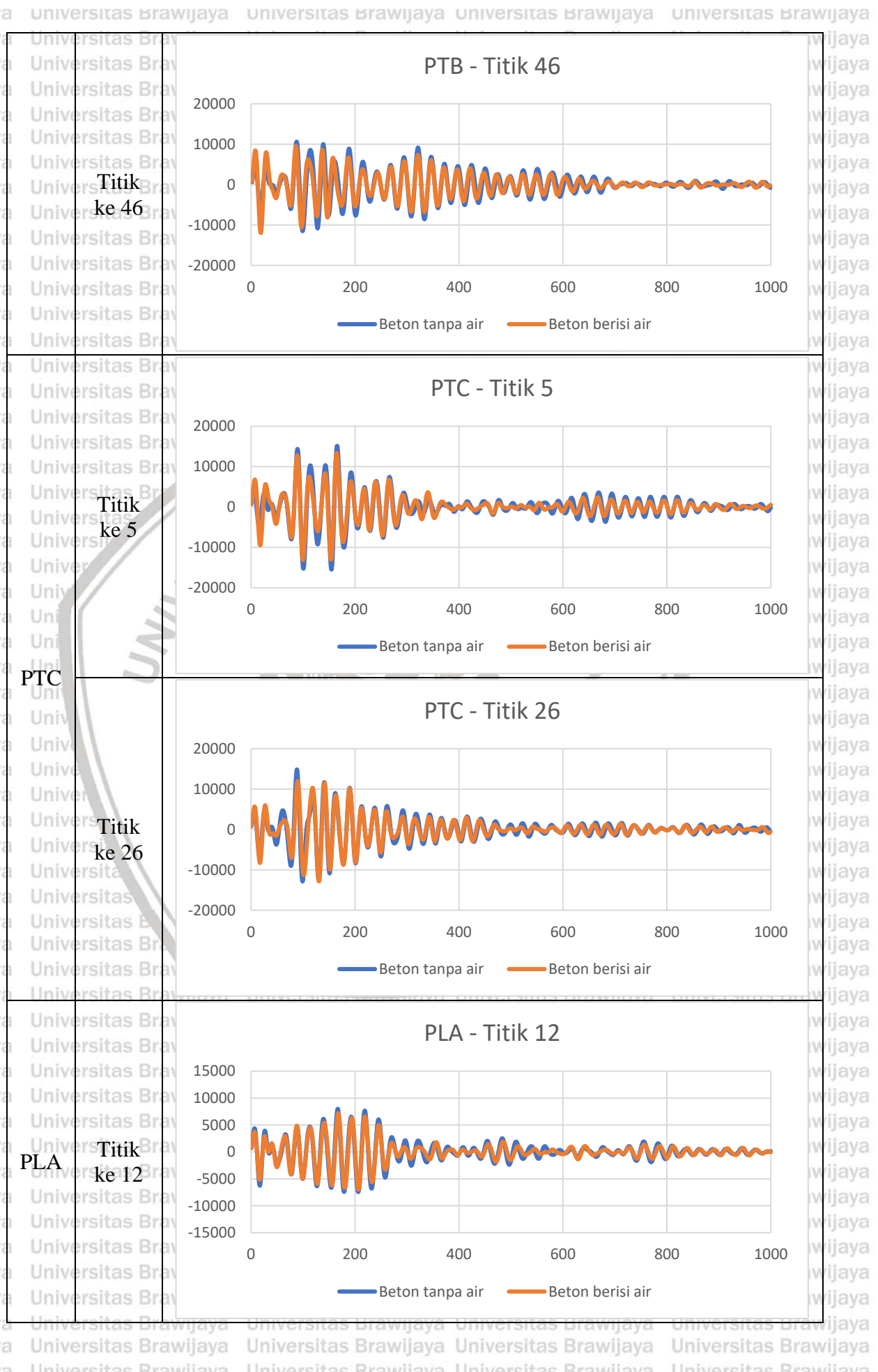
#### 4.6.2.2 *Waveform* (Bentuk Gelombang) Lubang Tanpa Air dan Berisi Air

Analisis hasil pengujian UPE dengan metode b-scan dapat berupa meninjau *waveform* (bentuk gelombang) dari beton dengan lubang tanpa air dan berisi air. Pengaruh dari bentuk gelombang dapat menentukan besarnya gelombang yang diterima oleh *receiver*. Gelombang pada UPE berupa gelombang pantulan atau *echo*, kondisi dari beton dengan lubang tanpa air dan berisi air akan mempengaruhi besarnya pantulan balik dari gelombang tersebut. Hasil dari perbandingan *waveform* (bentuk gelombang) beton dengan lubang tanpa air dan berisi air dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

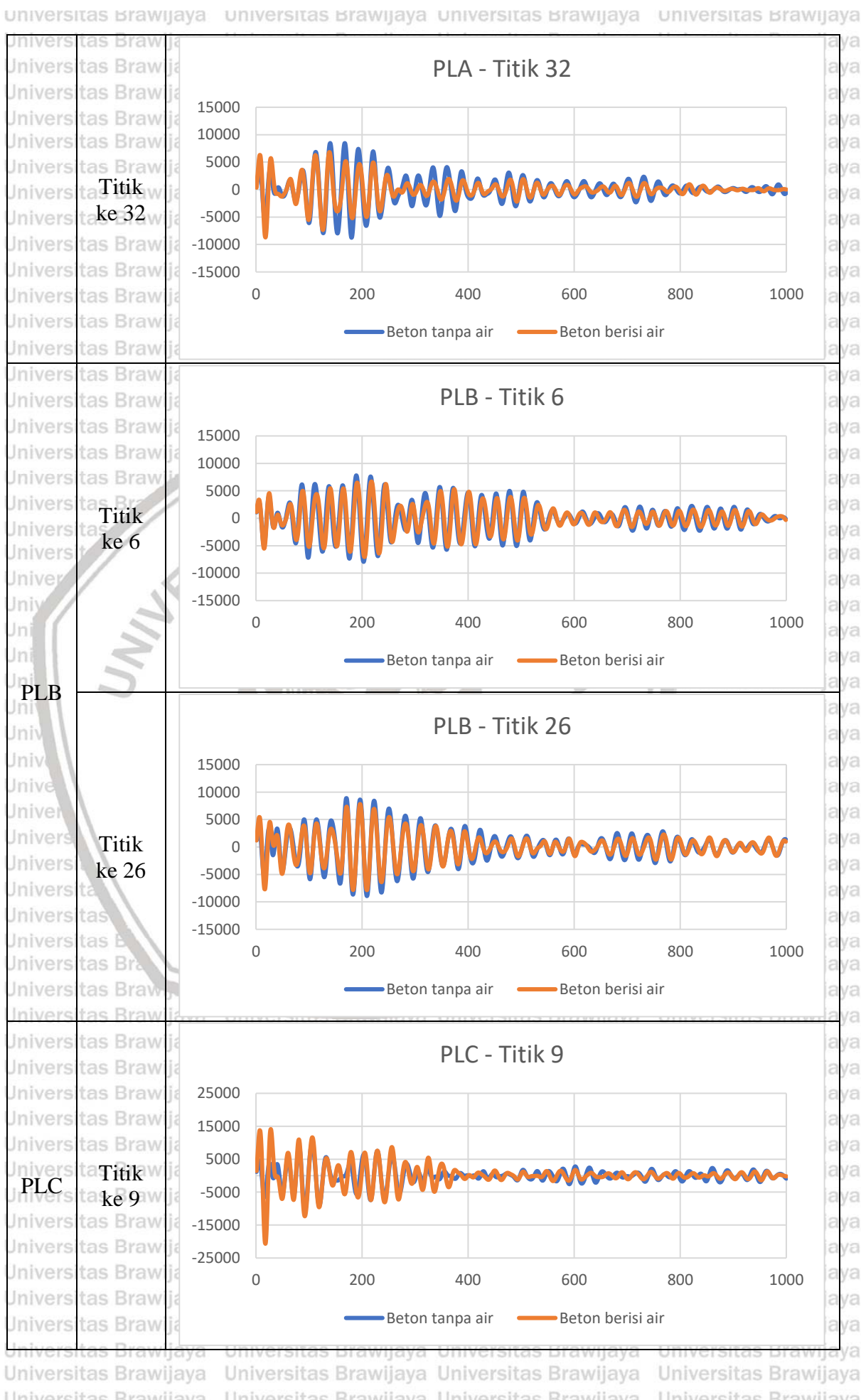


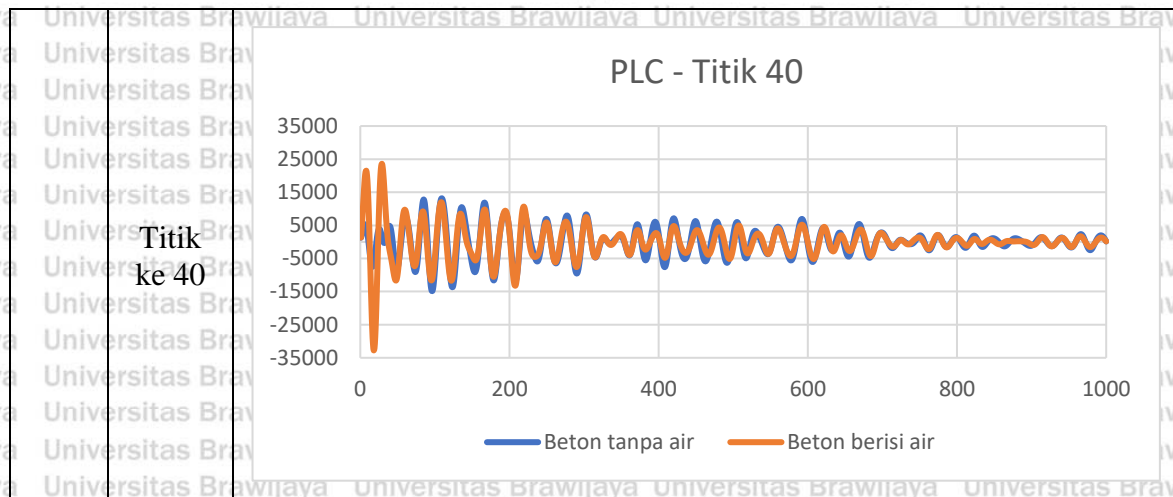
Tabel 4.10 Bentuk gelombang b-scan beton dengan lubang tanpa air dan berisi air.

Kode	Sampel titik	Hasil B - Scan
PTA	Titik ke 7	
PTA	Titik ke 47	
PTB	Titik ke 26	









Titik – titik yang diambil sebagai sampel merupakan lokasi lubang pada beton serta pemilihan titik tersebut diambil secara acak. Perbandingan *waveform* (bentuk gelombang) antara beton dengan lubang tanpa air dan berisi air mendapatkan hasil yang cukup berpengaruh. Secara keseluruhan pengaruh yang dapat terlihat adalah beton dengan lubang tanpa air memiliki *waveform* yang lebih besar daripada *waveform* benda uji beton dengan lubang berisi air. Hal ini terjadi karena beton dengan lubang berisi air meredam besarnya pantulan sehingga *waveform* dari gelombang *echo* tidak terlalu besar.

Perbedaan juga terlihat pada benda uji beton dengan lubang arah longitudinal diameter lubang 4 inch (PLC). *Waveform* dari benda uji PLC dengan lubang berisi air memiliki loncatan gelombang awal yang tinggi daripada benda uji yang lainnya. Hal ini dapat terjadi karena benda uji PLC memiliki tebal beton yang kecil karena pengaruh dimensi lubang yang besar.

Kesimpulan dari perbandingan *waveform* (bentuk gelombang) adalah adanya pengaruh berupa beton dengan intrusi air akan memiliki *waveform* yang lebih rendah daripada beton berlubang.

#### 4.6.2.3 Velocity (Cepat Rambat) Lubang Tanpa Air dan Berisi Air

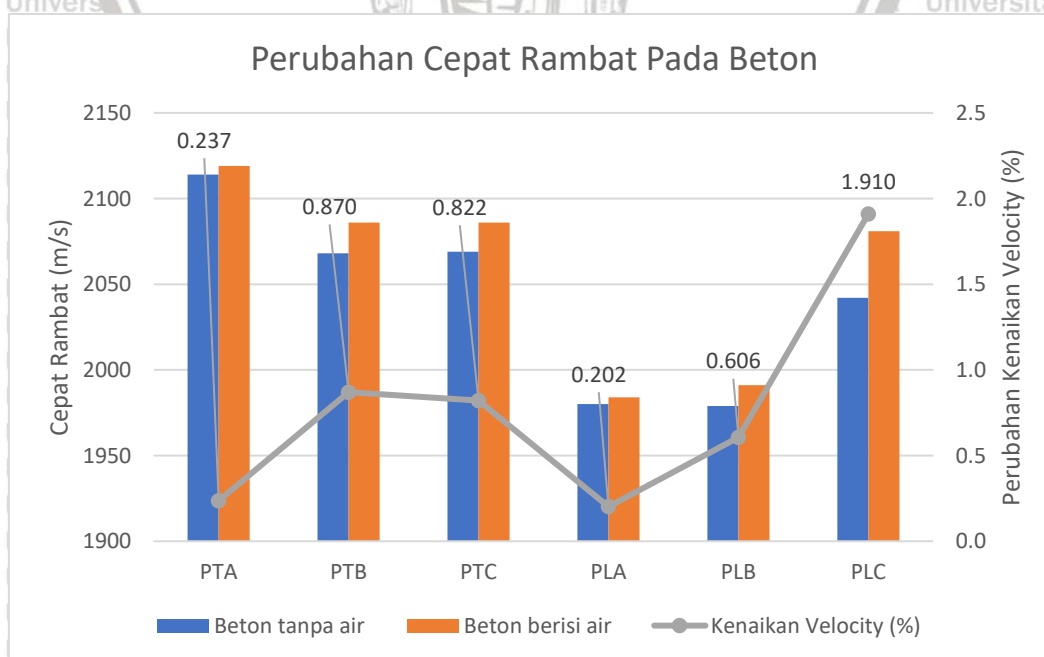
Pengujian UPE menggunakan metode b-scan dapat ditinjau dari hasil *velocity* (cepat rambat) yang terbaca oleh transmiter. *Velocity* pada pengujian UPE dengan metode b-scan didapatkan sebelum melakukan *scanning* dengan mencari tahu kecepatan rata-rata dari beton tersebut. Pada penelitian ini banyaknya pengambilan sampel kecepatan dilakukan dengan jumlah minimal 7 titik di sepanjang lokasi *scanning*.



Analisis pengujian UPE dengan metode b-scan dapat berupa meninjau perubahan *velocity* (cepat rambat) pada beton dengan lubang tanpa air dan berisi air. Perubahan *velocity* dapat menunjukkan kepadatan atau keseragaman yang ada di dalam beton. Analisis dengan meninjau perubahan *velocity* dapat dilihat pada tabel dan gambar di bawah ini.

Tabel 4.11 Hasil *velocity* (cepat rambat) pengujian UPE metode b-scan.

Benda Uji	Kode Benda Uji	Kondisi Beton	<i>Velocity</i> (m/s)	Kenaikan <i>Velocity</i> (%)
Beton dengan lubang arah transversal (3 pipa)	PTA (2 inch)	Tanpa air	2114	0.237
		Berisi air	2119	
	PTB (3 inch)	Tanpa air	2068	0.870
		Berisi air	2086	
	PTC (4 inch)	Tanpa air	2069	0.822
		Berisi air	2086	
Beton dengan lubang arah longitudinal (1 pipa)	PLA (2 inch)	Tanpa air	1980	0.202
		Berisi air	1984	
	PLB (3 inch)	Tanpa air	1979	0.606
		Berisi air	1991	
	PLC (4 inch)	Tanpa air	2042	1.910
		Berisi air	2081	



Gambar 4.15 *Velocity* beton dengan lubang tanpa air dan berisi air.

*Velocity* berdasarkan hasil pengujian UPE dengan metode b-scan mendapatkan hasil yang bervariasi antara lubang tanpa air dan berisi air. Secara keseluruhan beton tanpa air memiliki *velocity* yang lebih rendah daripada beton berisi air, hal ini dapat terjadi karena beton dengan lubang arah transversal memiliki bagian yang penuh oleh beton. Persentase kenaikan *velocity* untuk benda uji beton dengan lubang arah transversal memiliki besaran yang hampir sama, sedangkan untuk benda uji dengan lubang arah longitudinal memiliki *velocity* yang meningkat sebanding dengan diameter lubang.

Persentase kenaikan pada beton dengan lubang arah transversal memiliki nilai terendah sebesar 0.237% dan nilai tertinggi sebesar 0.87%. Perubahan persentase pada beton dengan lubang arah transversal antara satu benda uji dengan yang lainnya tidak terlalu signifikan, hal ini dapat terjadi karena tebal beton dari permukaan *scanning* menuju ke lubang tidak berubah pada setiap benda uji.

Persentase kenaikan beton dengan lubang arah longitudinal memiliki nilai terendah sebesar 0.202% dan nilai tertinggi sebesar 1.91%. Persentase pada beton dengan lubang arah longitudinal memiliki perubahan yang cukup signifikan, terlihat dari kenaikan persentase untuk setiap benda uji seiring dengan besarnya dimensi lubang. Kenaikan ini dapat terjadi karena tebal beton dari permukaan *scanning* menuju ke lubang semakin kecil dengan bertambahnya dimensi lubang. Dimensi lubang yang semakin besar dapat mempengaruhi medium perambatan gelombang. Beton dengan lubang berisi air akan menyebabkan gelombang tetap merambat di area berlubang, sehingga memiliki pengaruh yang cukup signifikan pada setiap perubahan dimensi lubang.

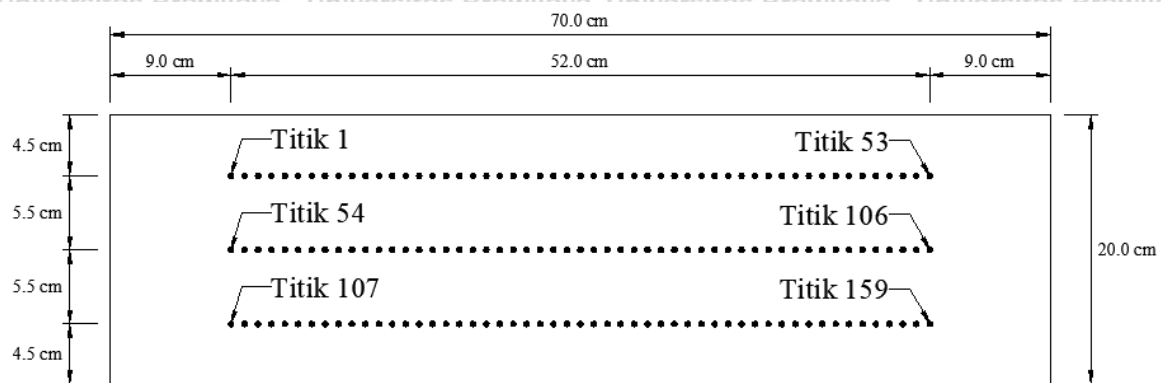
Kesimpulan yang dapat diambil adalah adanya pengaruh *velocity* beton terhadap intrusi air. Persentase perubahan cepat rambat pada setiap benda uji mengalami kenaikan, namun tidak signifikan. Persentase kenaikan rata-rata beton dengan lubang arah transversal sebesar 0.643%, sedangkan persentase kenaikan rata-rata beton dengan lubang arah longitudinal memiliki nilai sebesar 0.906%.

#### 4.7 Hasil Pengujian UPE dengan Metode A – Scan

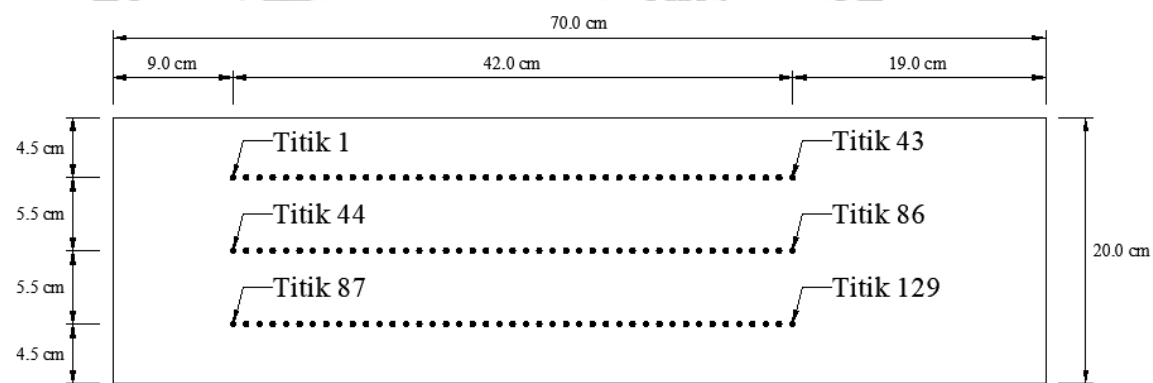
Pengujian a-scan dilakukan terhadap beton normal dan beton dengan lubang tanpa berisi air dan berisi air. Skema pengambilan titik pengujian pada beton normal dan beton dengan lubang arah transversal memiliki jumlah titik yang sama sebanyak 159 titik (3 baris berjumlah 53 titik), sedangkan untuk beton dengan lubang arah longitudinal memiliki jumlah titik sebanyak 129 titik (3 baris berjumlah 43 titik).



Perbedaan ini dikarenakan beton dengan lubang arah longitudinal memiliki lubang sepanjang 50 cm dan dalam pengujian ini dilakukan pada area lubang saja. Berikut merupakan skema pengambilan titik pengujian UPE dengan metode a-scan.



Gambar 4.16 Titik pengujian a-scan beton normal dan beton dengan lubang arah transversal

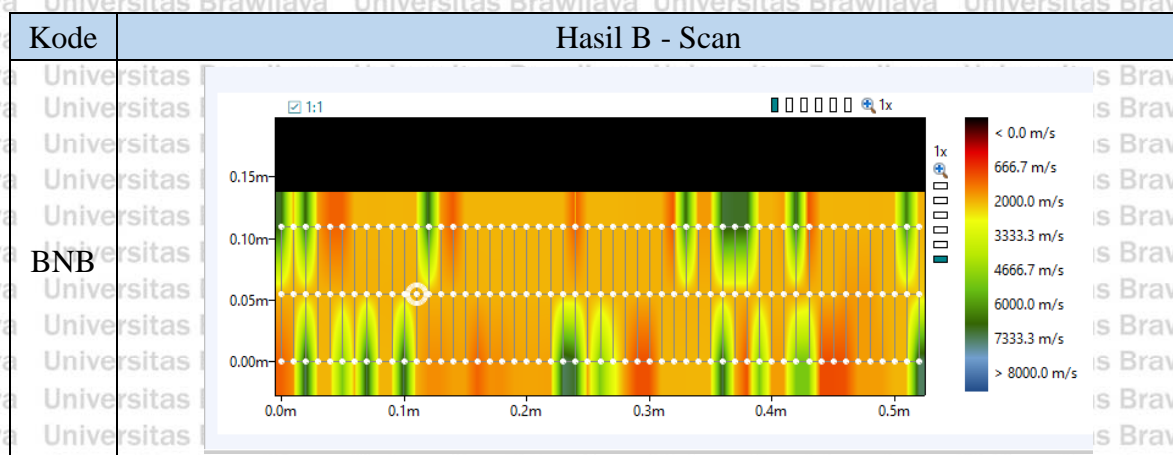


Gambar 4.17 Titik pengujian a-scan beton dengan lubang arah longitudinal

#### 4.7.1 Beton Normal

Pengujian UPE (*Ultrasonic Pulse Echo*) dengan metode a-scan terhadap beton normal dilakukan dengan jumlah sebanyak 159 titik (3 baris dengan jarak 52 cm). Pengujian dengan metode a-scan mendapatkan hasil berupa pemindaian (*scanning*) benda uji dengan bentuk 2 dimensi sesuai dengan permukaan di titik pengujian. Hasil pengujian UPE pada beton normal bisa dilihat pada gambar di bawah ini.

Tabel 4.12 Hasil A – scan beton normal.



Pengujian UPE dengan metode a-scan terhadap beton normal mendapatkan hasil *scanning* yang cukup bervariasi. Warna yang ditunjukkan oleh hasil pembacaan dapat diketahui bahwa terdapat warna hijau dan oranye, perbedaan warna tersebut menunjukkan adanya perbedaan cepat rambat pada titik tersebut sesuai dengan kategori warna. Beton normal pada penelitian ini bertujuan sebagai kontrol analisis dengan benda uji yang lainnya. Kontrol yang dimaksud adalah kondisi balok yang tidak memiliki pengaruh terhadap variasi bentuk seperti beton dengan lubang.

#### 4.7.2 Beton dengan Lubang Arah Transversal dan Longitudinal

Pengujian UPE (*Ultrasonic Pulse Echo*) dengan metode a-scan terhadap beton dengan lubang arah transversal dilakukan dengan jumlah titik sebanyak 159 titik (jarak 52 cm dengan 3 baris), sedangkan untuk lubang dengan arah longitudinal memiliki jumlah titik sebanyak 129 titik (jarak 42 cm dengan 3 baris). Pengujian yang dilakukan terhadap benda uji ini dilakukan dengan 2 kondisi, kondisi yang dimaksud berupa beton dengan lubang tanpa air dan lubang berisi air. Analisis yang dilakukan pada pengujian UPE metode a-scan adalah membandingkan hasil *scanning* dan *waveform* antara benda uji beton dengan lubang tanpa air dan berisi air, sampel yang diambil sejumlah 6 titik.

##### 4.7.2.1 Hasil *Scanning* (Pemindaian) Lubang Tanpa Air dan Berisi Air

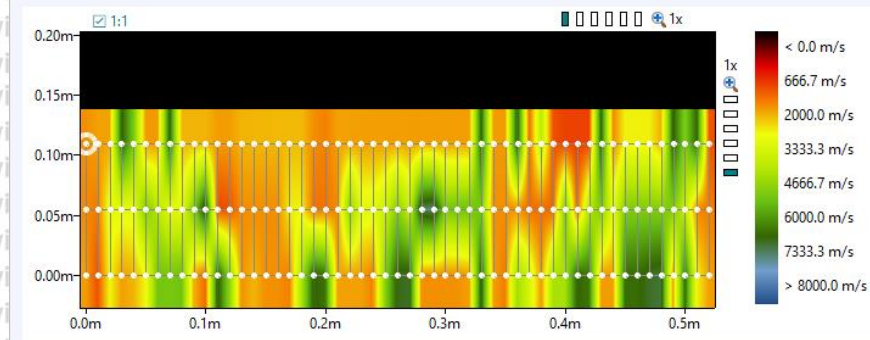
Analisis yang dilakukan berupa membandingkan hasil *scanning* (pemindaian) dari pengujian UPE terhadap beton dengan lubang tanpa air dan berisi air. Hasil pengujian UPE metode a-scan pada beton dengan lubang arah transversal dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Tabel 4.13 Hasil pemindaian a-scan beton dengan lubang tanpa air dan berisi air

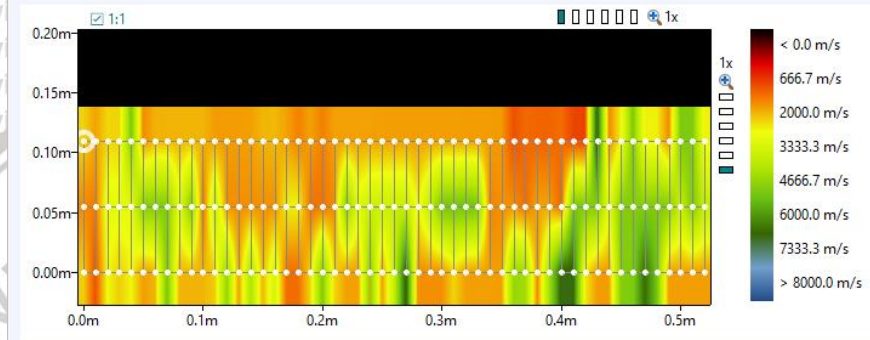
Kode	Kondisi Beton	Hasil B - Scan
PTA	Lubang tanpa air	
PTB	Lubang berisi air	
PTA	Lubang tanpa air	
PTB	Lubang berisi air	

Lubang  
tanpa  
air

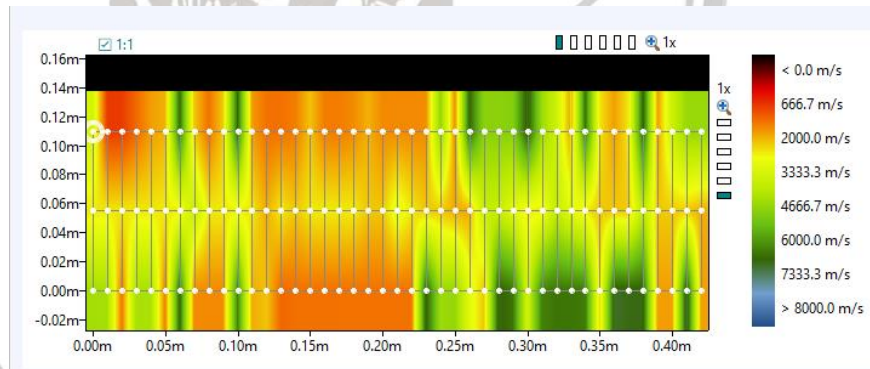


PTC

Lubang  
berisi  
air

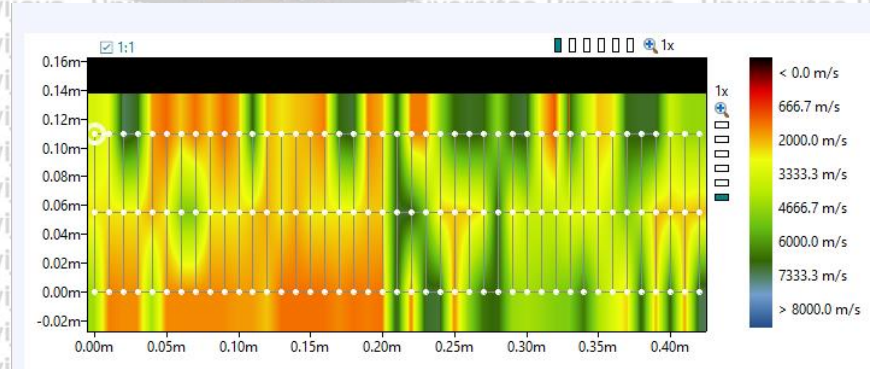


Lubang  
tanpa  
air

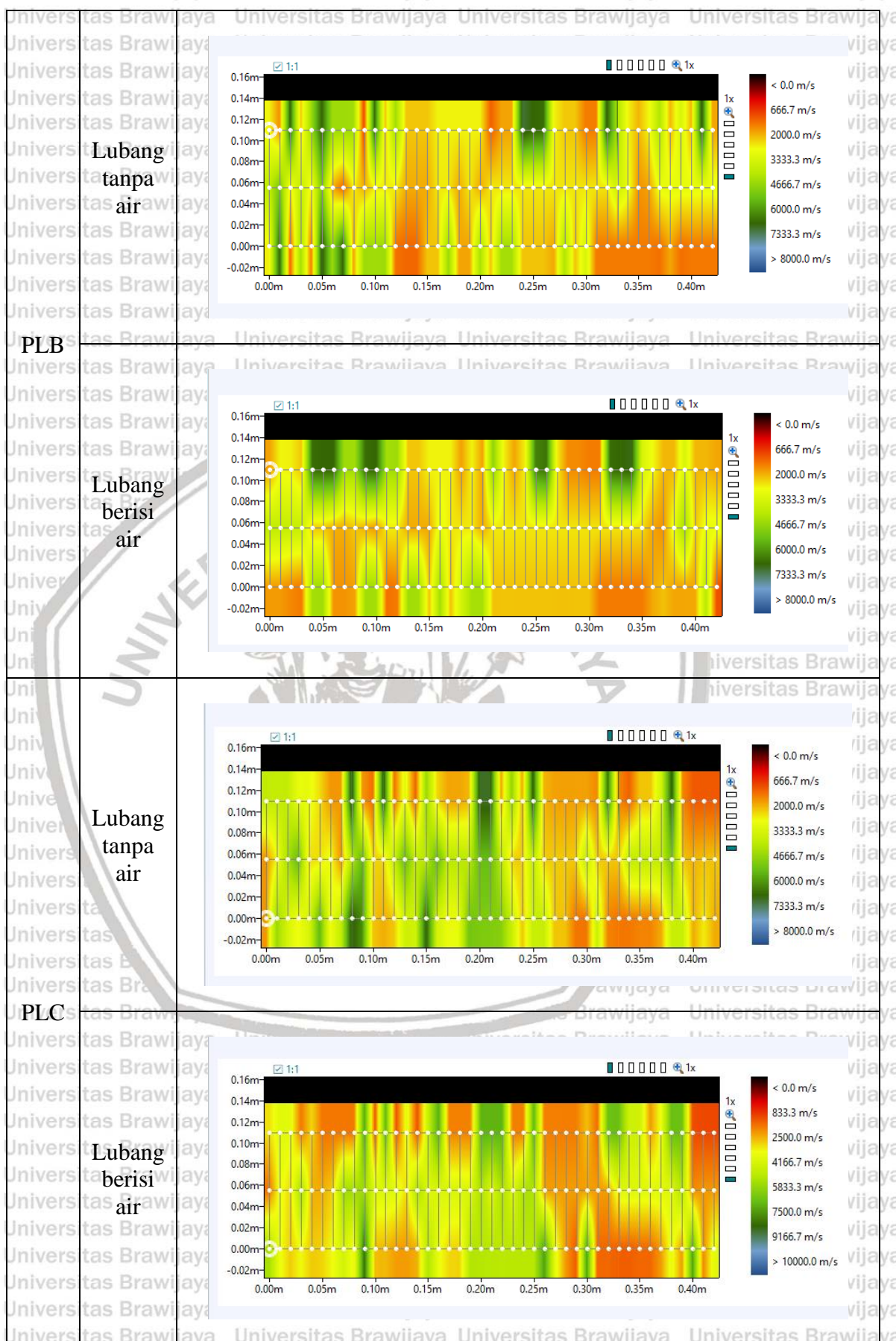


PLA

Lubang  
berisi  
air







Hasil pemindaian metode a-scan terhadap beton dengan lubang tanpa air dan lubang berisi air cukup sulit untuk membedakan secara visual. Pengujian dilakukan terhadap beton dengan lubang arah transversal dan longitudinal menampilkan hasil yang berbeda.

Beton dengan lubang arah transversal mendapatkan hasil yang cukup bagus, hal ini ditunjukkan berdasarkan terdapatnya pemindaian yang jelas pada area lubang. Kondisi beton dengan lubang tanpa air dan berisi air mendapatkan hasil yang tidak jauh berbeda. Perbedaan terlihat pada hasil pemindaian berupa spektrum warna pada beton berisi air lebih cerah dari pada beton tanpa air yang memiliki warna lebih gelap atau kontras. Hal ini dapat terjadi karena warna pada lubang tanpa air antara beton dan lubang mendapatkan hasil gelombang yang cukup berbeda. Impedansi akustik beton dengan lubang tanpa air memiliki gelombang yang dipantulkan secara penuh, sedangkan untuk beton dengan lubang berisi air memiliki gelombang yang masih diteruskan. Warna pada beton dengan lubang berisi air tidak terlalu kontras dikarenakan gelombang masih dapat diteruskan melalui media air.

Beton dengan lubang arah longitudinal mendapatkan hasil yang kurang bagus, jika dilihat secara visual sulit untuk membedakan hasil pembacaan. Hasil pembacaan memiliki kesamaan yang hampir mirip seperti beton dengan lubang arah transversal berupa warna yang lebih terang pada beton berisi air dari pada beton tanpa air. Hasil pembacaan beton dengan lubang arah longitudinal mendapatkan hasil yang kurang bagus dapat disebabkan karena media perambatan beton tidak rata, hal yang dimaksud adalah dengan adanya lubang yang berbentuk lingkaran pada beton menyebabkan pantulan yang diterima oleh *receiver* sulit untuk didapatkan. Berbeda dengan beton dengan lubang arah transversal yang terlihat jelas perbedaan warna pada area lubang. Hal tersebut dikarenakan beton dengan lubang arah transversal memiliki tebal beton yang merata sebesar 5 cm dari titik pengujian menuju area lubang, sehingga gelombang dapat merambat dengan baik.

Kesimpulan yang dapat diambil dari pengujian UPE dengan metode a-scan adalah adanya pengaruh intrusi air terhadap beton berupa hasil warna yang lebih cerah berdasarkan hasil *scanning* (pemindaian).

#### 4.7.2.2 Waveform (Bentuk Gelombang) Lubang Tanpa Air dan Berisi Air.

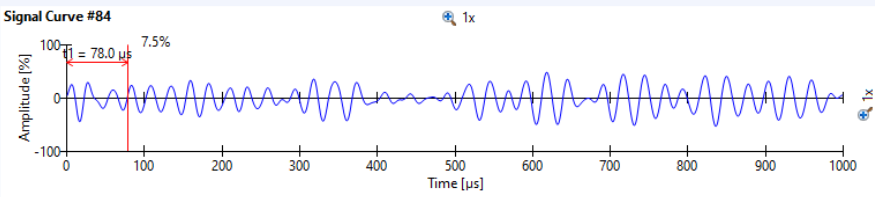
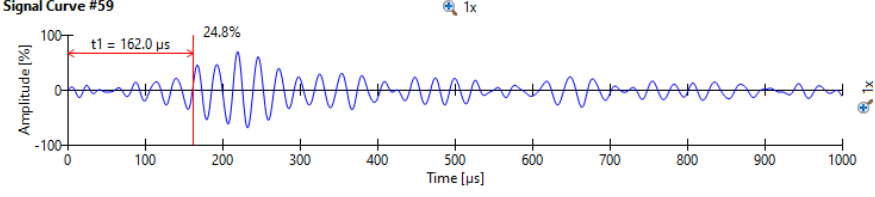
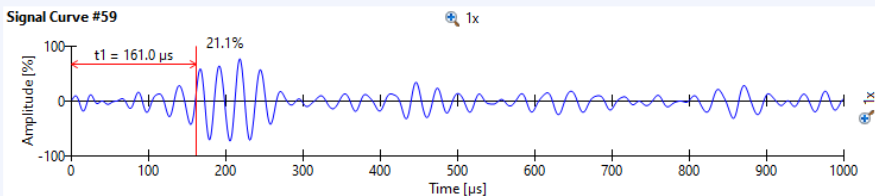
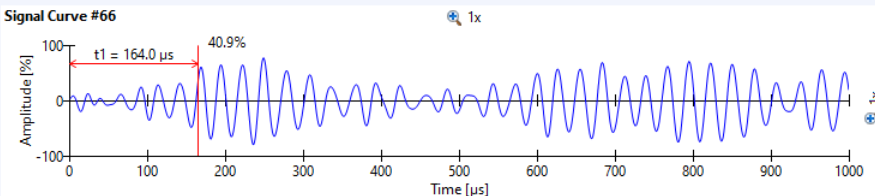
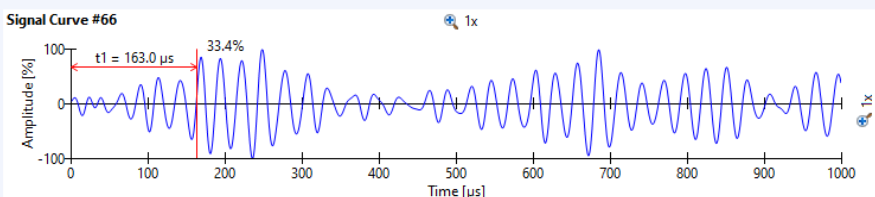
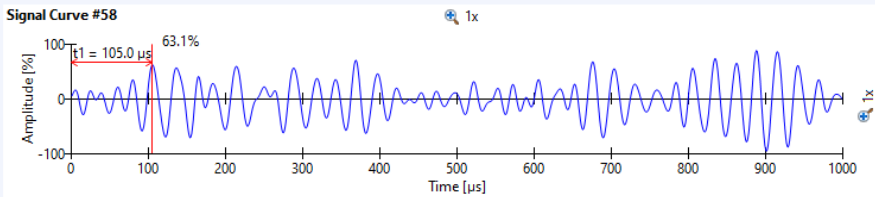
Analisis hasil pengujian UPE dengan metode a-scan dapat berupa meninjau *waveform* (bentuk gelombang) dari beton dengan lubang tanpa air dan berisi air. Pengaruh dari bentuk gelombang dapat menentukan besarnya gelombang yang diterima oleh *receiver*. Gelombang pada UPE berupa gelombang pantulan atau *echo*, kondisi dari beton dengan lubang tanpa air dan berisi air akan mempengaruhi besarnya pantulan balik dari gelombang tersebut.



Hasil dari perbandingan *waveform* (bentuk gelombang) beton dengan lubang tanpa air dan berisi air dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

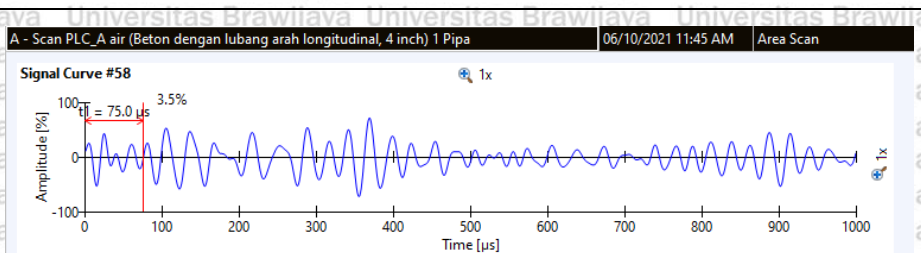
Tabel 4.14 Contoh *waveform* a-scan beton dengan lubang tanpa air dan berisi air

Kode	Kondisi Beton	Hasil B - Scan
PTA	Lubang tanpa air	<p>A - Scan PTA_B (Beton dengan lubang arah transversal, 2 inch) 3 Pipa, bagian bawah 06/08/2021 11:10 AM</p> <p>Signal Curve #60</p> <p>Amplitude [%]</p> <p>Time [µs]</p> <p><math>t_1 = 104.0 \mu s</math> 38.7%</p>
Titik 60	Lubang berisi air	<p>A - Scan PTA_B air (Beton dengan lubang arah transversal, 2 inch) 3 Pipa, bagian bawah 06/25/2021 10:24 AM</p> <p>Signal Curve #60</p> <p>Amplitude [%]</p> <p>Time [µs]</p> <p><math>t_1 = 104.0 \mu s</math> 28.6%</p>
PTB	Lubang tanpa air	<p>A - Scan PTB_B (Beton dengan lubang arah transversal, 3 inch) 3 Pipa, bagian bawah 06/08/2021 10:33 AM Area Scan</p> <p>Signal Curve #62</p> <p>Amplitude [%]</p> <p>Time [µs]</p> <p><math>t_1 = 236.0 \mu s</math> 19.6%</p>
Titik 62	Lubang berisi air	<p>A - Scan PTB_B air (Beton dengan lubang arah transversal, 3 inch) 3 Pipa, bagian bawah 06/24/2021 12:35 PM Area Scan</p> <p>Signal Curve #62</p> <p>Amplitude [%]</p> <p>Time [µs]</p> <p><math>t_1 = 235.0 \mu s</math> 19.3%</p>
PTC	Lubang tanpa air	<p>A - Scan PTC_B (Beton dengan lubang arah transversal, 4 inch) 3 Pipa, bagian bawah 06/08/2021 9:57 AM</p> <p>Signal Curve #84</p> <p>Amplitude [%]</p> <p>Time [µs]</p> <p><math>t_1 = 79.0 \mu s</math> 7.8%</p>
Titik 84	Lubang berisi air	

	Lubang berisi air	<p>A - Scan PTC_B air (Beton dengan lubang arah transversal, 4 inch) 3 Pipa, bagian bawah 06/25/2021 1:20 PM</p> <p>Signal Curve #84</p> 
PLA	Lubang tanpa air	<p>A - Scan PLA_D (Beton dengan lubang arah longitudinal, 2 inch) 1 Pipa 06/08/2021 11:55 AM Area Scan</p> <p>Signal Curve #59</p> 
Titik 59	Lubang berisi air	<p>A - Scan PLA_D air - 1 (Beton dengan lubang arah longitudinal, 2 inch) 1 Pipa 06/09/2021 2:31 PM Area Scan</p> <p>Signal Curve #59</p> 
PLB	Lubang tanpa air	<p>A - Scan PLB_A (Beton dengan lubang arah longitudinal, 3 inch) 1 Pipa 06/08/2021 12:24 PM Area Scan</p> <p>Signal Curve #66</p> 
Titik 66	Lubang berisi air	<p>A - Scan PLB_A air (Beton dengan lubang arah longitudinal, 3 inch) 1 Pipa 06/25/2021 2:55 PM Area Scan</p> <p>Signal Curve #66</p> 
PLC Titik 58	Lubang tanpa air	<p>A - Scan PLC_A (Beton dengan lubang arah longitudinal, 4 inch) 1 Pipa 06/08/2021 11:26 AM Area Scan</p> <p>Signal Curve #58</p> 



Lubang  
berisi  
air



Hasil *waveform* yang ditampilkan pada tabel di atas merupakan sampel dari data keseluruhan, *waveform* lainnya dicantumkan pada lampiran. Hasil pengujian UPE dengan metode a-scan mendapatkan hasil *waveform* yang hampir sama dengan metode b-scan. Secara keseluruhan *waveform* dari beton dengan lubang tanpa air memiliki gelombang yang lebih tinggi daripada lubang berisi air, gelombang ultrasonik berupa *echo* diredam oleh adanya material air.

Meninjau dari waktu tempuh awal ( $t_1$ ) dan amplitudo ( $A_1$ ) mendapatkan hasil berupa  $t_1$  dari beton tanpa air memiliki nilai yang lebih tinggi daripada beton berisi air. Waktu tempuh awal yang lebih tinggi menandakan bahwa gelombang tersebut memiliki *velocity* yang lebih rendah. Hal ini sesuai dengan perbandingan *velocity* pada pengujian dengan metode b-scan yang mana *velocity* beton tanpa air memiliki nilai lebih rendah daripada beton berisi air. Rekapitulasi hasil perbandingan *waveform* pengujian UPE dengan metode a-scan dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 4.15 Rekapitulasi data  $t_1$  dan  $A_1$  *waveform* beton dengan lubang arah transversal

Kode Benda Uji	Sampel	Lokasi Titik	Kondisi Beton	Waktu ( $\mu s$ )		Amplitudo (%)	
				$t_1$	$t_{maks}$	$A_1$	$A_{maks}$
PTA (2 inch)	Titik 23	Beton	Tanpa Air	259	276.3	44.6	82.3
			Berisi Air	259	263.6	39.1	81
	Titik 151	Beton	Tanpa Air	232	249.2	19.9	49.7
			Berisi Air	232	248.9	17.9	30.4
	Titik 64	Perbatasan	Tanpa Air	78	133.1	13.6	55.8
			Berisi Air	77	132.6	2	79.8
	Titik 60	Lubang	Tanpa Air	104	120.9	38.7	76.3
			Berisi Air	104	120.6	28.6	62.9
	Titik 81	Lubang	Tanpa Air	106	122.2	65.8	100.6
			Berisi Air	105	122	51.2	98.9

PTB (3 inch)	Titik 102	Lubang	Tanpa Air	82	292.2	10.2	74.3
			Berisi Air	81	292.7	3.8	77.6
	Titik 2	Beton	Tanpa Air	227	257	41.4	73.4
			Berisi Air	227	256.1	27.9	62.1
	Titik 151	Beton	Tanpa Air	260	364	35.8	59.5
			Berisi Air	260	364	18	33.6
	Titik 55	Perbatasan	Tanpa Air	82	266.6	7.3	66.5
			Berisi Air	81	309.1	7.2	63.6
	Titik 62	Lubang	Tanpa Air	236	320	19.6	44.4
			Berisi Air	235	306	19.3	39.7
	Titik 78	Lubang	Tanpa Air	79	136.9	1.2	51.4
			Berisi Air	78	135.2	1.9	71.5
	Titik 98	Lubang	Tanpa Air	80	319	20.9	86.7
			Berisi Air	79	344.1	10.8	87
	Titik 11	Beton	Tanpa Air	206	222.1	48.7	78.7
			Berisi Air	206	222.1	41.6	64.2
PTC (4 inch)	Titik 137	Beton	Tanpa Air	254	258.5	24.5	43.8
			Berisi Air	254	258.5	21.5	39.3
	Titik 75	Perbatasan	Tanpa Air	263	320.9	32.8	53.6
			Berisi Air	261	277.3	37	42.2
	Titik 62	Lubang	Tanpa Air	136	163.5	34.5	88.4
			Berisi Air	135	162.9	29.2	75.1
	Titik 84	Lubang	Tanpa Air	79	836.4	7.8	85
			Berisi Air	78	834.9	7.5	51.4
	Titik 99	Lubang	Tanpa Air	82	87.6	20.8	100.6
			Berisi Air	81	98	6.9	100.6

Tabel 4.16 Rekapitulasi data t1 dan A1 *waveform* beton dengan lubang arah longitudinal

Kode Benda Uji	Sampel	Lokasi Titik	Kondisi Beton	Waktu ( $\mu$ s)		Amplitudo (%)	
				t1	tmaks	t1	tmaks
PLA (2 inch)	Titik 29	Beton	Tanpa Air	84	303	44.6	82.3
			Berisi Air	84	303	39.1	81
	Titik 121	Beton	Tanpa Air	63	311.9	19.9	49.7
			Berisi Air	63	340.1	17.9	30.4

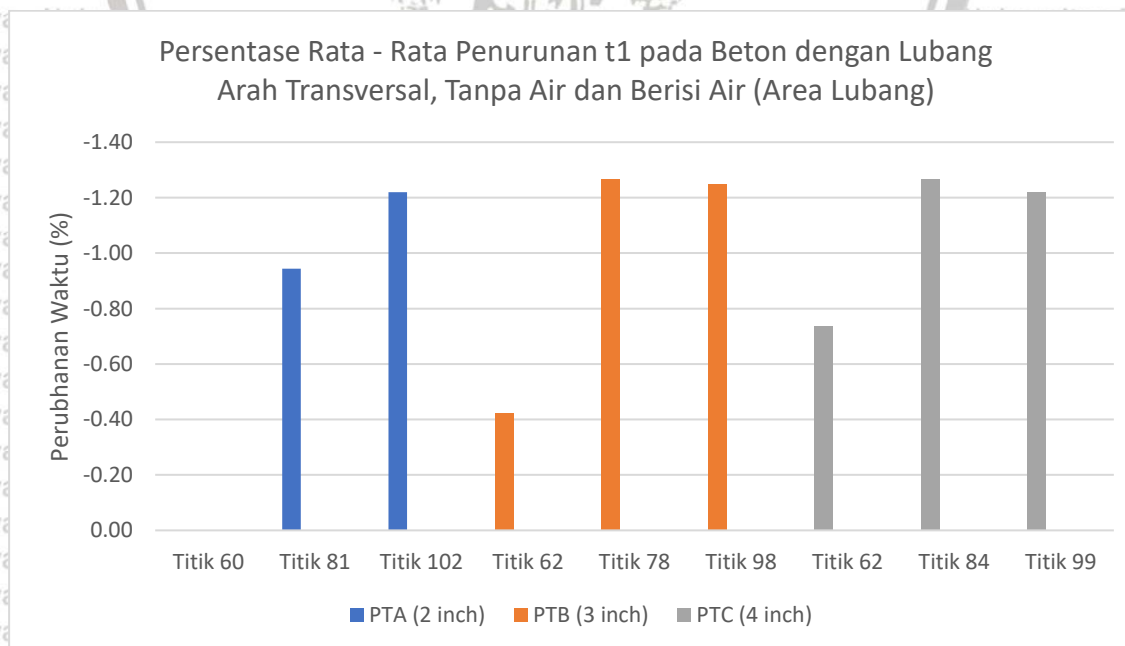


Titik 52	Lubang	Tanpa Air	162	207.7	13.6	55.8
		Berisi Air	160	176.9	2	79.8
Titik 59	Lubang	Tanpa Air	162	218.2	38.7	76.3
		Berisi Air	161	216.7	28.6	62.9
Titik 69	Lubang	Tanpa Air	217	233.8	65.8	100.6
		Berisi Air	187	203	51.2	98.9
Titik 86	Lubang	Tanpa Air	185	212.8	10.2	74.3
		Berisi Air	184	201.5	3.8	77.6
Titik 15	Beton	Tanpa Air	189	578.1	41.4	73.4
		Berisi Air	189	578.4	27.9	62.1
Titik 113	Beton	Tanpa Air	192	521.5	35.8	59.5
		Berisi Air	192	433.8	18	33.6
Titik 46	Lubang	Tanpa Air	159	175.4	7.3	66.5
		Berisi Air	109	174.4	7.2	63.6
Titik 60	Lubang	Tanpa Air	162	220	19.6	44.4
		Berisi Air	138	166	19.3	39.7
Titik 66	Lubang	Tanpa Air	164	247.7	1.2	51.4
		Berisi Air	163	247.7	1.9	71.5
Titik 80	Lubang	Tanpa Air	197	226.1	20.9	86.7
		Berisi Air	170	224.6	10.8	87
Titik 5	Beton	Tanpa Air	140	260	48.7	78.7
		Berisi Air	140	246.1	41.6	64.2
Titik 115	Beton	Tanpa Air	190	310.7	24.5	43.8
		Berisi Air	190	206.1	21.5	39.3
Titik 52	Lubang	Tanpa Air	101	116.9	32.8	53.6
		Berisi Air	73	116.9	37	42.2
Titik 58	Lubang	Tanpa Air	105	368	34.5	88.4
		Berisi Air	75	368	29.2	75.1
Titik 69	Lubang	Tanpa Air	104	201	7.8	85
		Berisi Air	77	187.7	7.5	51.4
Titik 78	Lubang	Tanpa Air	106	122	20.8	100.6
		Berisi Air	105	122	6.9	100.6

Tabel 4.17 Rekapitulasi persentase perubahan waktu t1 pada beton area lubang

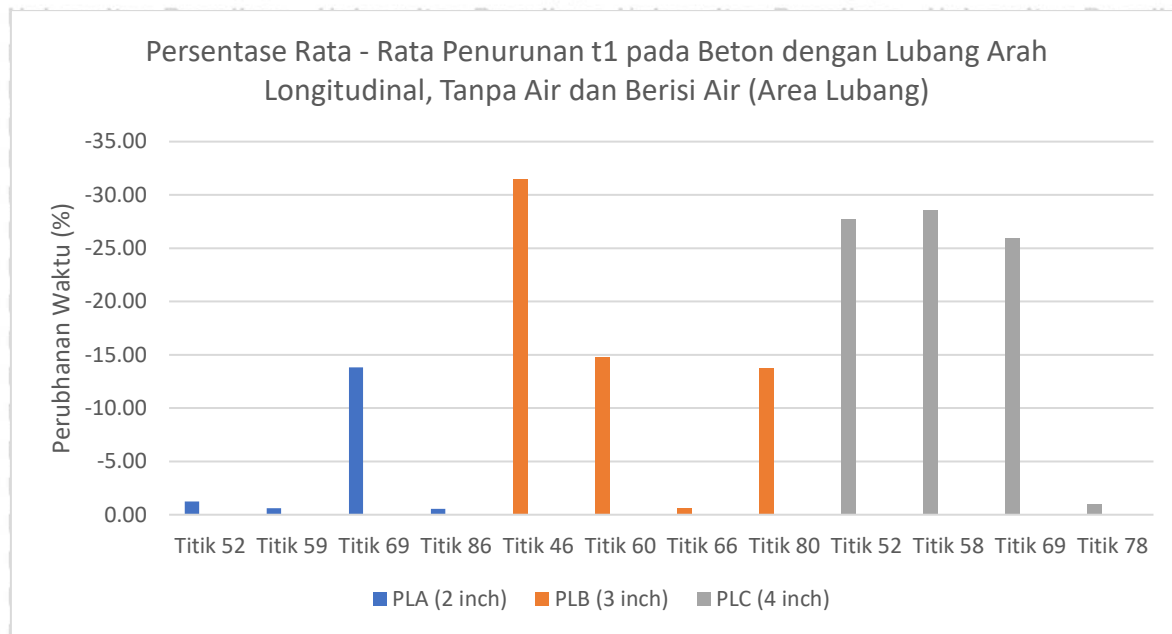
Kode Benda Uji	Sampel Titik	Perubahan Waktu, t1 (%)	Rata – Rata (%)
PTA (2 inch)	Titik 60	0.0000	
	Titik 81	-0.9434	0.7210
	Titik 102	-1.2195	

	Titik 62	-0.4237	
PTB (3 inch)	Titik 78	-1.2658	0.9799
	Titik 98	-1.2500	
	Titik 62	-0.7353	
PTC (4 inch)	Titik 84	-1.2658	1.0735
	Titik 99	-1.2195	
	Titik 52	-1.2346	
	Titik 59	-0.6173	
PLA (2 inch)	Titik 69	-13.8249	4.0543
	Titik 86	-0.5405	
	Titik 46	-31.4465	
	Titik 60	-14.8148	
PLB (3 inch)	Titik 66	-0.6098	15.1442
	Titik 80	-13.7056	
	Titik 52	-27.7228	
	Titik 58	-28.5714	
PLC (4 inch)	Titik 69	-25.9615	20.7998
	Titik 78	-0.9434	

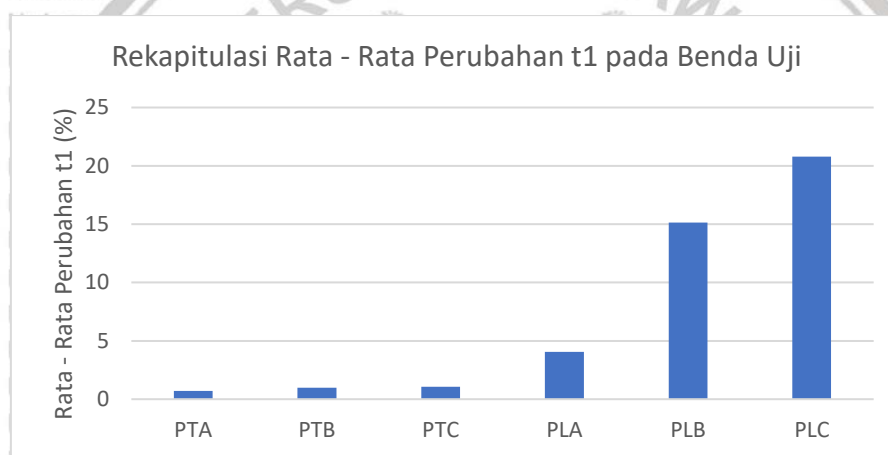


Gambar 4.18 Grafik perubahan t1 pada beton dengan lubang arah transversal





Gambar 4.19 Grafik perubahan t1 pada beton dengan lubang arah longitudinal



Gambar 4.20 Rekapitulasi rata-rata perubahan t1

Perbandingan perubahan waktu awal ( $t_1$ ) pada beton dengan lubang tanpa air dan berisi air mendapatkan hasil berupa  $t_1$  beton tanpa air memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan beton berisi air. Grafik rata-rata perubahan  $t_1$  menunjukkan persentase perubahan  $t_1$  antara beton tanpa air dan berisi air dari 6 sampel titik yang diambil.

Beton dengan lubang arah transversal memiliki persentase perubahan  $t_1$  yang hampir sama pada setiap benda ujinya, sedangkan beton dengan lubang arah longitudinal memiliki perubahan persentase yang cukup signifikan pada setiap benda ujinya. Perubahan ini sesuai dengan perbandingan *velocity* menggunakan metode b-scan. Sesuai yang dimaksud adalah apabila waktu tempuh yang dimiliki suatu gelombang semakin kecil, maka kecepatan dari gelombang tersebut akan semakin besar.

Perubahan rata-rata  $t_1$  pada beton dengan lubang arah transversal tidak terlalu signifikan, berbeda dengan lubang arah longitudinal yang cukup signifikan. Hal ini dapat terjadi sama halnya dengan perbandingan *velocity* dengan metode b-scan. perbedaan tersebut terjadi karena medium perambatan berupa beton pada titik pengujian menuju area lubang antara beton dengan lubang arah transversal dan longitudinal berbeda. Beton dengan lubang arah transversal memiliki tebal beton yang sama di setiap variasinya, sedangkan beton dengan lubang arah longitudinal memiliki tebal beton yang berbeda di setiap variasinya. Pengaruh yang diberikan dari tebal beton tersebut adalah medium perambatan gelombang akan berbeda. Tebal beton pada benda uji beton dengan lubang arah transversal memiliki nilai sebesar 10 cm, sedangkan untuk benda uji beton dengan lubang arah longitudinal semakin kecil dengan bertambahnya dimensi lubang.

Kesimpulan yang dapat diambil dari perbandingan  $t_1$  berdasarkan *waveform* pengujian UPE dengan metode a-scan adalah adanya pengaruh terhadap intrusi air berupa persentase penurunan  $t_1$  pada benda uji beton. Benda uji beton dengan lubang transversal mandatkan persentase penurunan rata-rata  $t_1$  sebesar 0.93%, sedangkan untuk benda uji beton dengan lubang arah longitudinal mengalami perubahan yang cukup signifikan di setiap benda ujinya dan memiliki persentase penurunan rata-rata sebesar 13.33%.



## BAB V

### PENUTUP

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan pada bab sebelumnya, maka pada penelitian ini dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Hasil pemindaian (*scanning*) dari pengujian b-scan maupun a-scan pada beton yang mengalami intrusi air akan mendapatkan spektrum warna yang lebih pudar. Warna pada beton dengan lubang tanpa air akan memiliki kontras yang lebih tinggi. Berdasarkan hasil pengujian UPE didapatkan bahwa pengujian pada beton yang mengalami intrusi air cukup sulit untuk dibedakan secara visual.
2. *Waveform* yang didapatkan dari pengujian UPE dengan metode b-scan pada beton yang mengalami intrusi air akan menghasilkan amplitudo yang lebih rendah dibandingkan dengan beton tanpa air. Pengaruh yang diberikan pada pengujian a-scan berupa adanya penurunan pada waktu transmisi ( $t_1$ ), pada beton dengan lubang arah transversal mendapatkan persentase penurunan sebesar 0.93% sedangkan untuk beton dengan lubang arah longitudinal mendapatkan persentase penurunan sebesar 13.33%. Pengujian UPE dengan metode a-scan pada beton yang mengalami intrusi air akan memiliki  $t_1$  yang rendah.
3. Hasil cepat rambat dari pengujian UPE metode b-scan pada beton yang mengalami intrusi air memiliki hasil kenaikan yang tidak cukup signifikan pada cepat rambat yang terjadi. Persentase kenaikan pada beton yang mengalami intrusi air sebesar 0.643% untuk beton dengan lubang arah transversal dan 0.906% untuk beton dengan lubang arah longitudinal. Hasil yang didapatkan dari analisis berupa pengujian UPE tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap beton yang mengalami intrusi air yang ditinjau dari cepat rambat gelombang.

## 5.2 Saran

Setelah melakukan penelitian di laboratorium dan mengolah data hasil pengujian, terdapat beberapa saran untuk penelitian selanjutnya, yaitu :

1. Pada penelitian selanjutnya diperlukan adanya penambahan jumlah serta variasi bentuk dari benda uji untuk menganalisis pengaruh intrusi air yang diberikan.
2. Perhatikan dengan cermat selama proses pembuatan benda uji untuk mengurangi peluang adanya kesalahan dalam benda uji.
3. Permukaan beton diupayakan sehalus mungkin dengan memperhatikan proses pemadatan, hal ini bertujuan agar pembacaan alat UPE mendapatkan hasil yang akurat.





## DAFTAR PUSTAKA

- Departemen Pekerjaan Umum. (2019). SNI 03-2847 Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Kang, Jae Mau. dkk. (2017). *Detection of Cavities Around Concrete Sewage Pipelines Using Impact-echo Method. Tunnelling and Underground Space Technology* 65
- Suseno, Hendro. (2010). Bahan Bangunan untuk Teknik Sipil. Malang: Bargie Media
- PROCEQ. (2015). Operating Instructions Pundit PL-200. Switzerland : Proceq.
- PROCEQ. (2017). Operating Instructions Pundit PL-200. Switzerland : Proceq.
- Saputra, Teguh Dwi. (2018). Investigasi Rongga dan Kedalaman Retak pada Balok Beto dengan UPE dan UPV. Jurnal Mahasiswa Jurusan Teknik Sipil 1 (1), pp. 412-422 2018
- Allena, Gabrielle., Wijatmiko, Indradi. & Waluyohadi, Indra (2020). Pengaruh Variasi Coating pada Beton Keropos terhadap Gelombang Echo dengan Menggunakan Metode UPE (Ultrasonic Pulse Echo). Jurnal Mahasiswa Jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya. Malang: Universitas Brawijaya.

(Halaman sengaja dikosongkan)





## LAMPIRAN

### Lampiran 1. Pembuatan Benda Uji

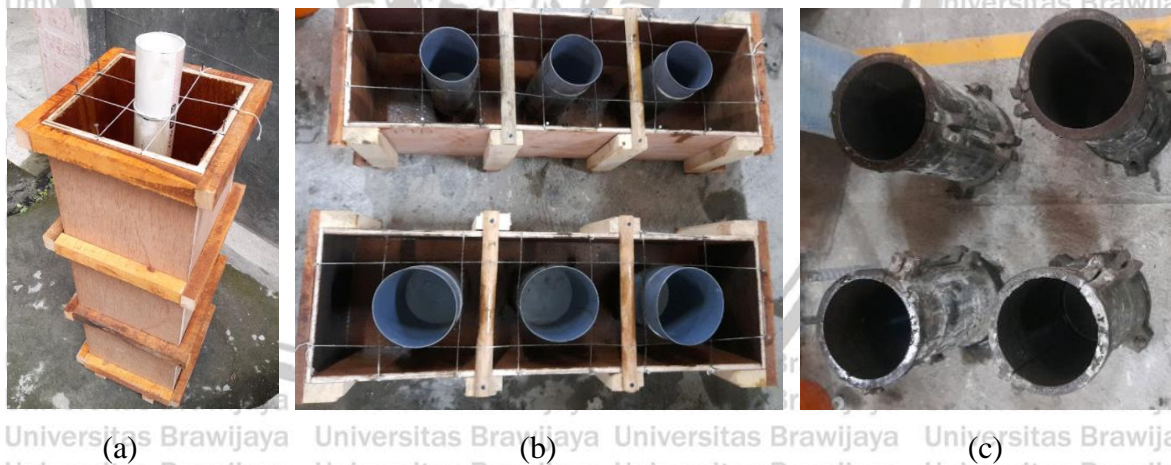


(a)

(b)

(c)

Gambar 1. Persiapan benda uji dengan menimbang material campuran beton (a) kerikil, (b) pasir, (c) semen



(a)

(b)

(c)

Gambar 2. Persiapan bekisting atau cetakan beton (a) beton dengan lubang arah longitudinal, (b) beton dengan lubang arah transversal, (c) cetakan silinder





(a)

(b)

Gambar 3. (a) Pengecoran beton, (b) hasil uji slump



(a)

(b)

Gambar 4. Pemadatan beton (a) Benda uji balok (b) Benda uji silinder



(a)

(b)

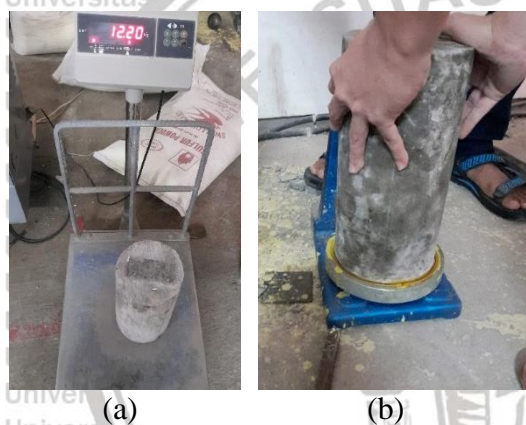
Gambar 5. Benda uji pada bekisting (a) lubang arah longitudinal, (b) lubang arah transversal





(a) (b)  
Gambar 6. Perawatan benda uji (a) balok, (b) silinder

## Lampiran 2. Pengujian Kuat Tekan



(a) (b)  
Gambar 7. Persiapan pengujian kuat tekan (a) menimbang benda uji silinder (b) caping benda uji silinder



(a) (b)  
Gambar 8. Pengujian kuat tekan menggunakan (a) Rebound Schmidt Hammer pada benda uji balok (b) *Compression Test Machine* (CTM) pada benda uji silinder



### Lampiran 3. Pengujian Non Destructive Test



Gambar 9. Kalibrasi alat UPE



Gambar 9. Pengujian UPE pada beton dengan lubang tanpa air



Gambar 10. Pengujian UPE pada beton dengan lubang arah longitudinal berisi air





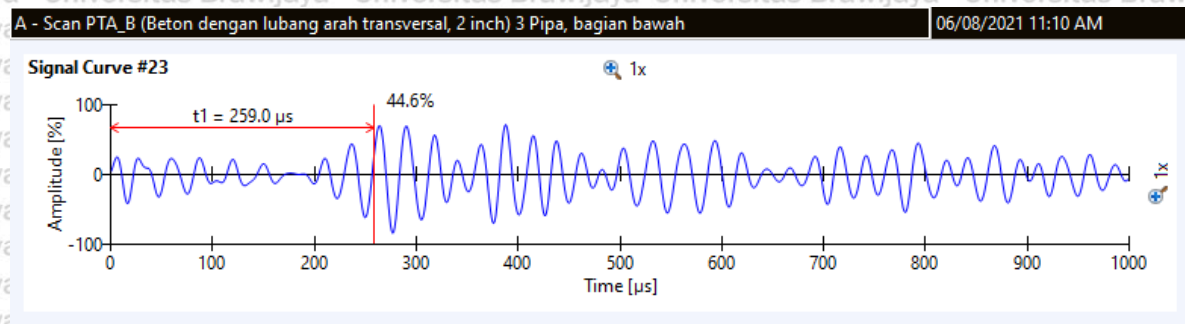
Gambar 11. Pengujian UPE pada beton dengan lubang arah transversal berisi air



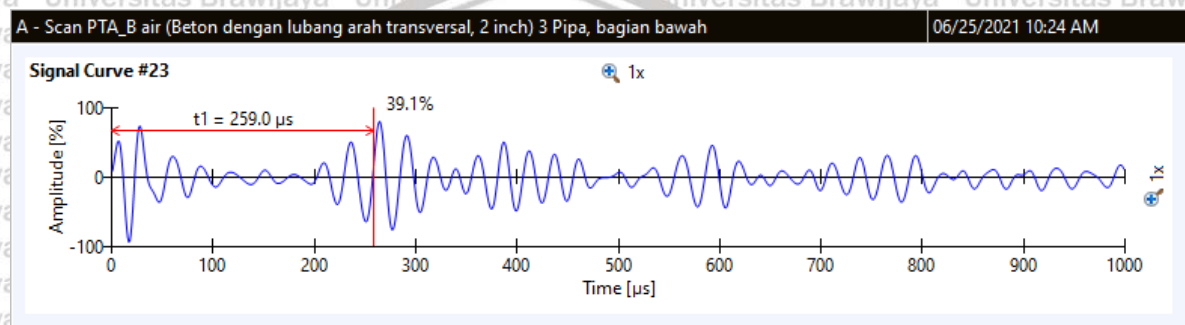
#### Lampiran 4. Waveform dari Sampel Titik Pengujian UPE Metode A-scan

PTA – Titik 23

- Beton dengan lubang tanpa air

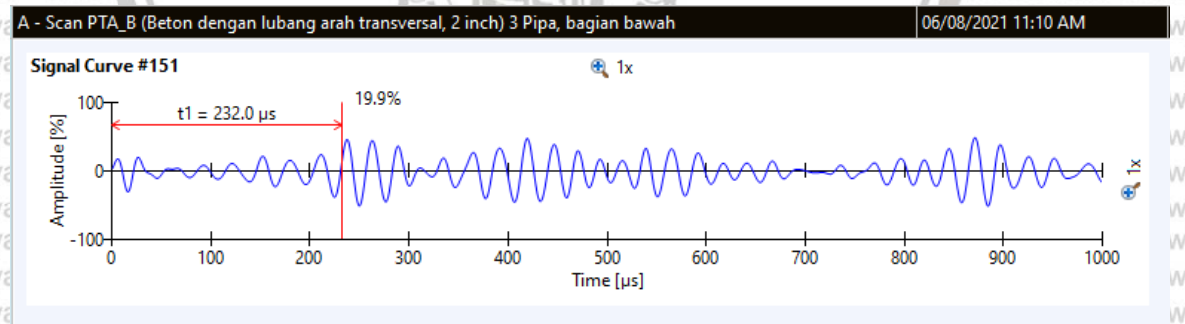


- Beton dengan lubang berisi air

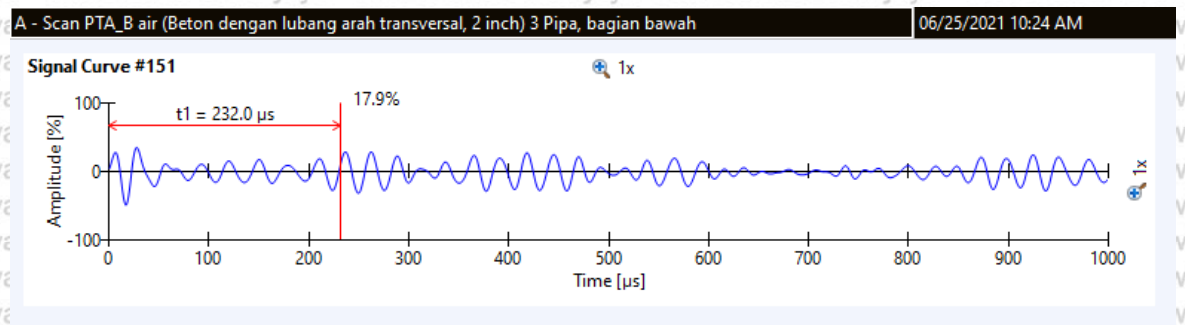


PTA – Titik 151

- Beton dengan lubang tanpa air



- Beton dengan lubang berisi air



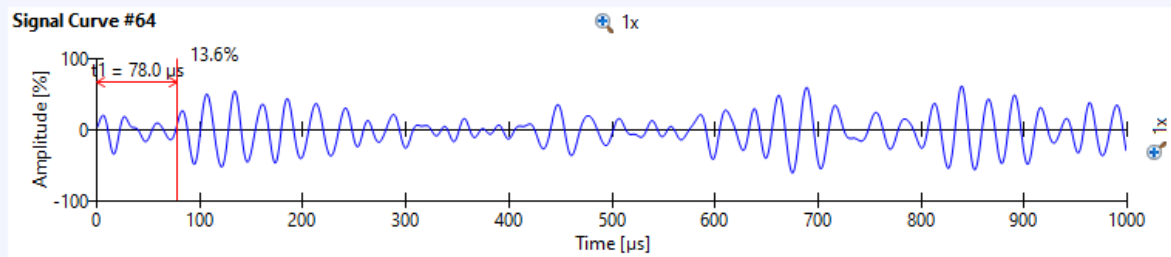


PTA – Titik 64

- Beton dengan lubang tanpa air

A - Scan PTA\_B (Beton dengan lubang arah transversal, 2 inch) 3 Pipa, bagian bawah

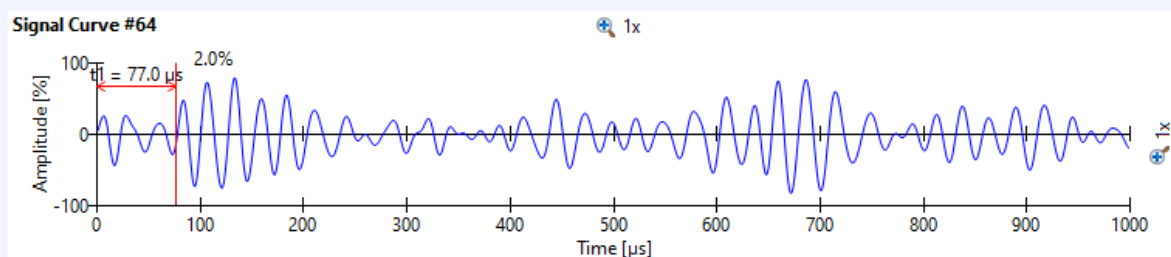
06/08/2021 11:10 AM



- Beton dengan lubang berisi air

A - Scan PTA\_B air (Beton dengan lubang arah transversal, 2 inch) 3 Pipa, bagian bawah

06/25/2021 10:24 AM

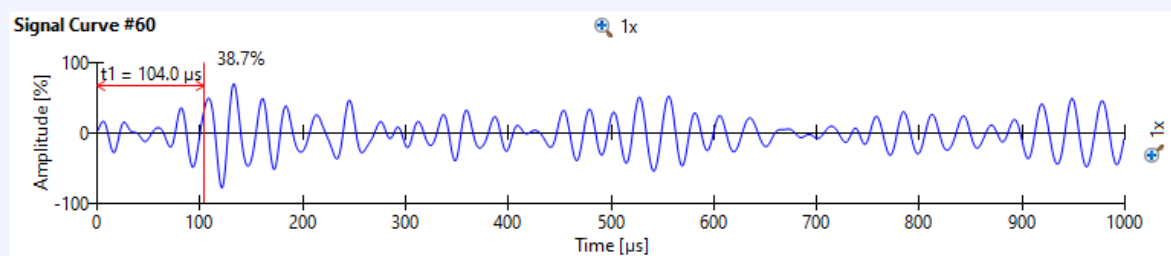


PTA – Titik 60

- Beton dengan lubang tanpa air

A - Scan PTA\_B (Beton dengan lubang arah transversal, 2 inch) 3 Pipa, bagian bawah

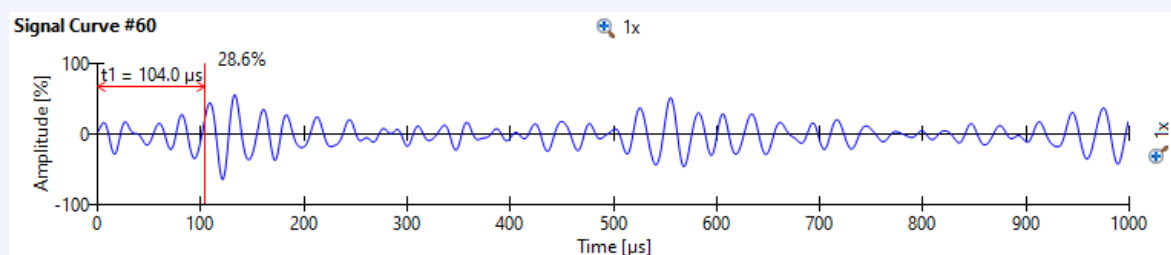
06/08/2021 11:10 AM



- Beton dengan lubang berisi air

A - Scan PTA\_B air (Beton dengan lubang arah transversal, 2 inch) 3 Pipa, bagian bawah

06/25/2021 10:24 AM



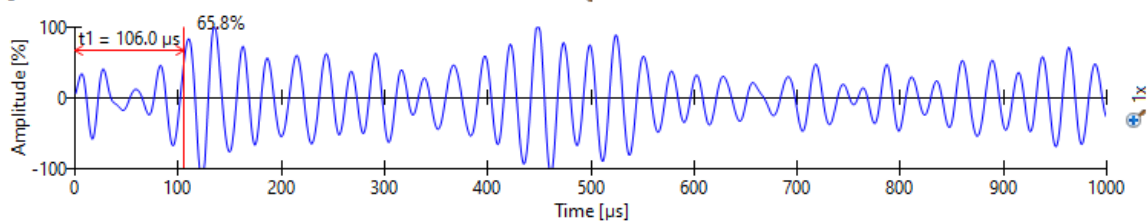
## PTA – Titik 81

- Beton dengan lubang tanpa air

A - Scan PTA\_B (Beton dengan lubang arah transversal, 2 inch) 3 Pipa, bagian bawah

06/08/2021 11:10 AM

Signal Curve #81

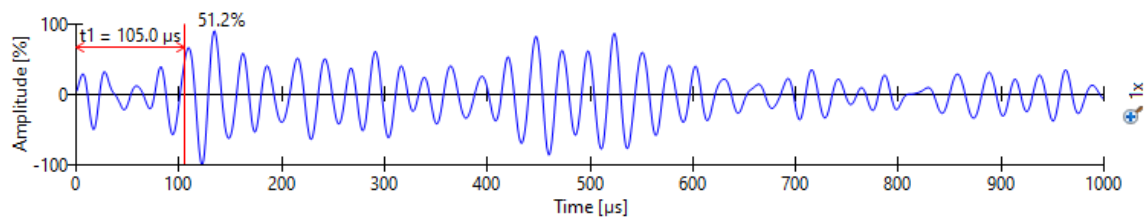


- Beton dengan lubang berisi air

A - Scan PTA\_B air (Beton dengan lubang arah transversal, 2 inch) 3 Pipa, bagian bawah

06/25/2021 10:24 AM

Signal Curve #81



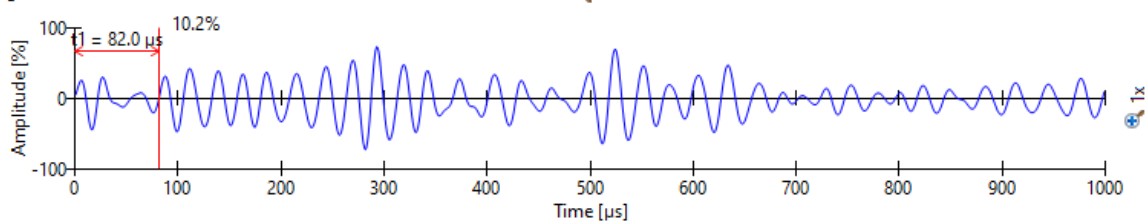
## PTA – Titik 102

- Beton dengan lubang tanpa air

A - Scan PTA\_B (Beton dengan lubang arah transversal, 2 inch) 3 Pipa, bagian bawah

06/08/2021 11:10 AM

Signal Curve #102

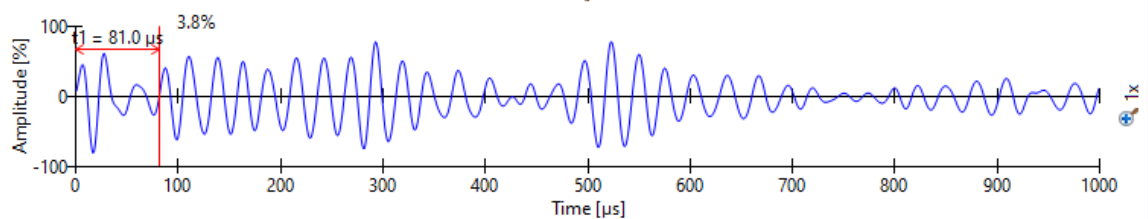


- Beton dengan lubang berisi air

A - Scan PTA\_B air (Beton dengan lubang arah transversal, 2 inch) 3 Pipa, bagian bawah

06/25/2021 10:24 AM

Signal Curve #102





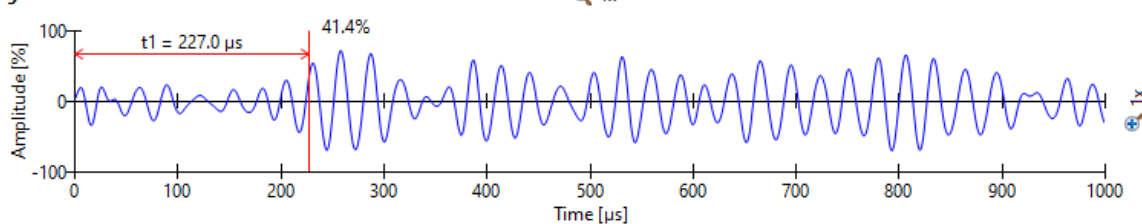
PTB – Titik 2

– Beton dengan lubang tanpa air

A - Scan PTB\_B (Beton dengan lubang arah transversal, 3 inch) 3 Pipa, bagian bawah

06/08/2021 10:33 AM

Signal Curve #2

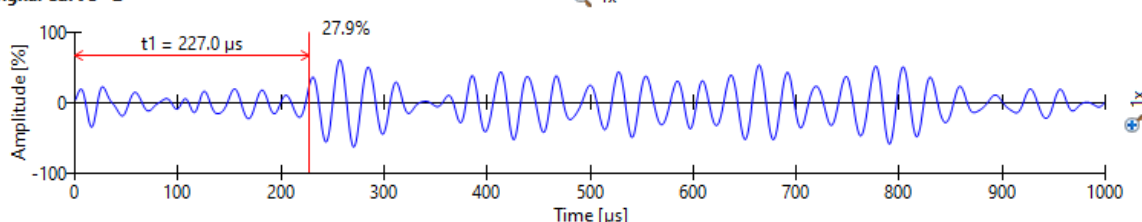


– Beton dengan lubang berisi air

A - Scan PTB\_B air (Beton dengan lubang arah transversal, 3 inch) 3 Pipa, bagian bawah

06/24/2021 12:35 PM

Signal Curve #2



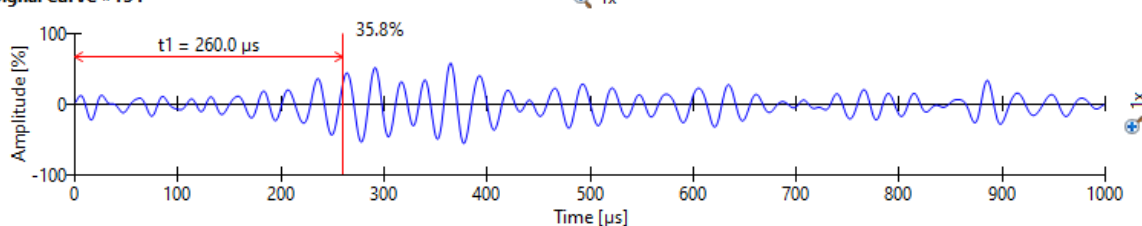
PTB – Titik 151

– Beton dengan lubang tanpa air

A - Scan PTB\_B (Beton dengan lubang arah transversal, 3 inch) 3 Pipa, bagian bawah

06/08/2021 10:33 AM

Signal Curve #151

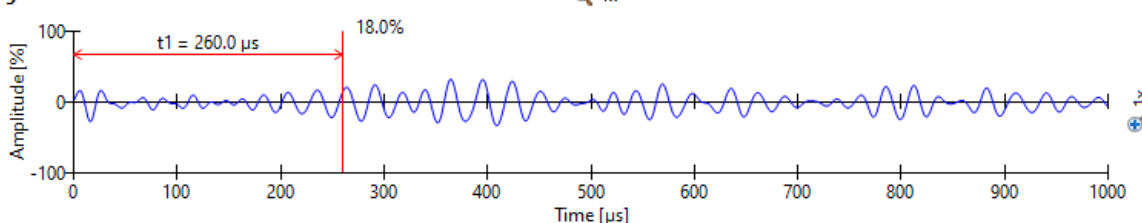


– Beton dengan lubang berisi air

A - Scan PTB\_B air (Beton dengan lubang arah transversal, 3 inch) 3 Pipa, bagian bawah

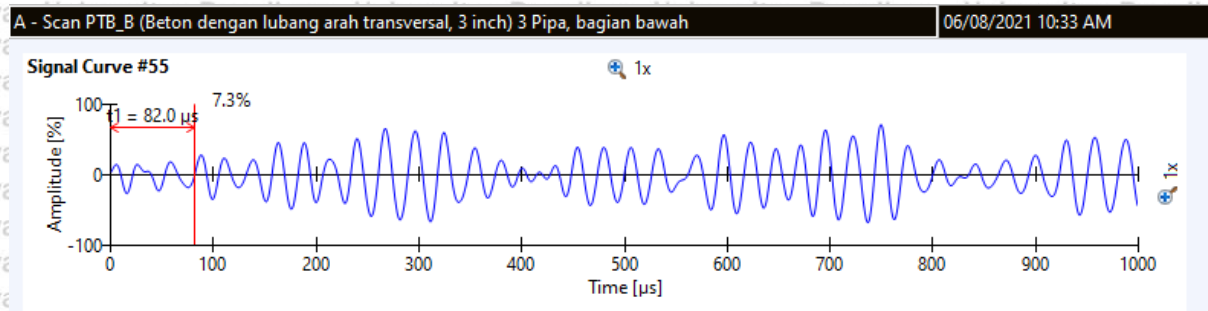
06/24/2021 12:35 PM

Signal Curve #151

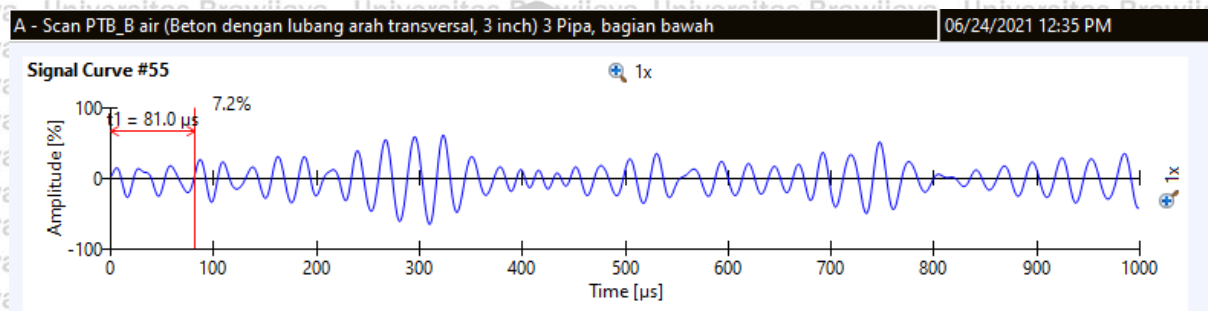


## PTB – Titik 55

- Beton dengan lubang tanpa air

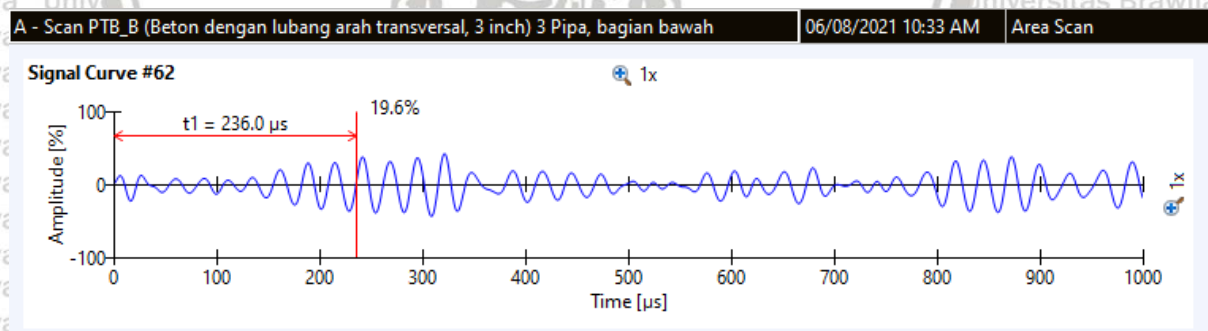


- Beton dengan lubang berisi air

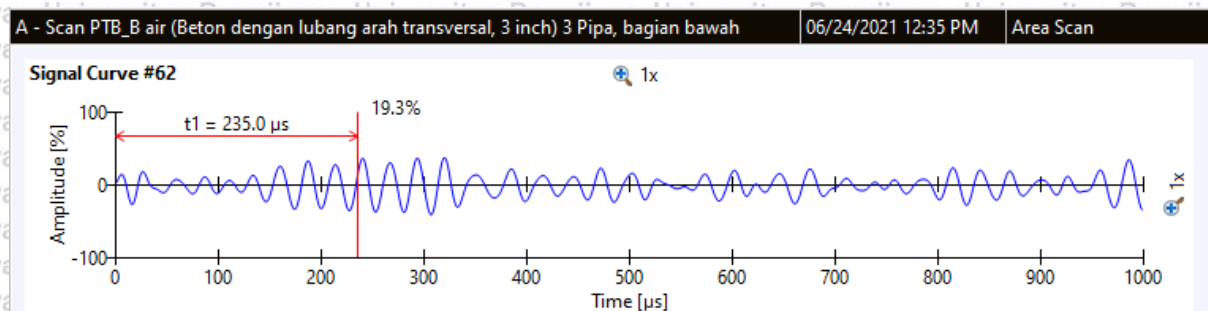


## PTB – Titik 62

- Beton dengan lubang tanpa air



- Beton dengan lubang berisi air





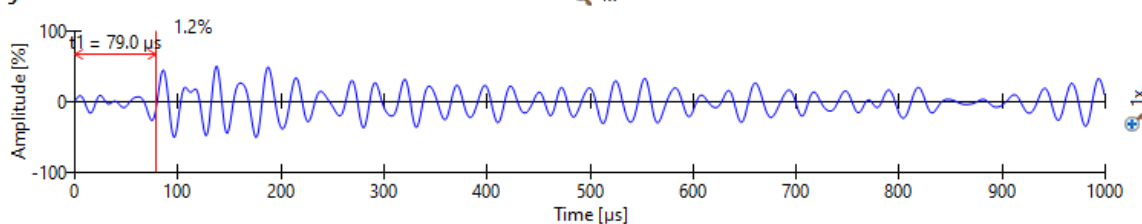
PTB – Titik 78

- Beton dengan lubang tanpa air

A - Scan PTB\_B (Beton dengan lubang arah transversal, 3 inch) 3 Pipa, bagian bawah

06/08/2021 10:33 AM

Signal Curve #78

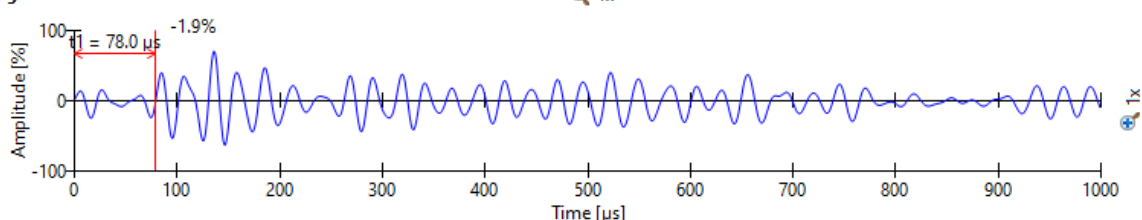


- Beton dengan lubang berisi air

A - Scan PTB\_B air (Beton dengan lubang arah transversal, 3 inch) 3 Pipa, bagian bawah

06/24/2021 12:35 PM

Signal Curve #78



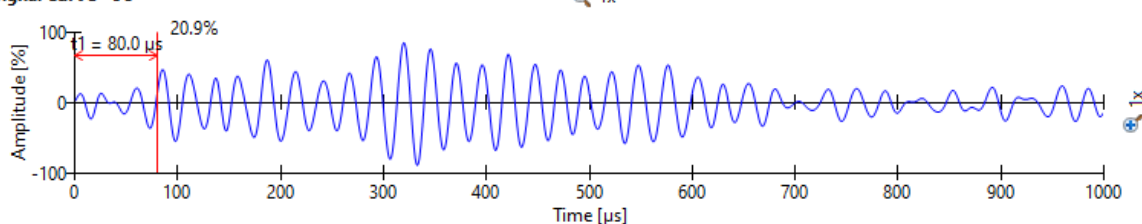
PTB – Titik 98

- Beton dengan lubang tanpa air

A - Scan PTB\_B (Beton dengan lubang arah transversal, 3 inch) 3 Pipa, bagian bawah

06/08/2021 10:33 AM

Signal Curve #98

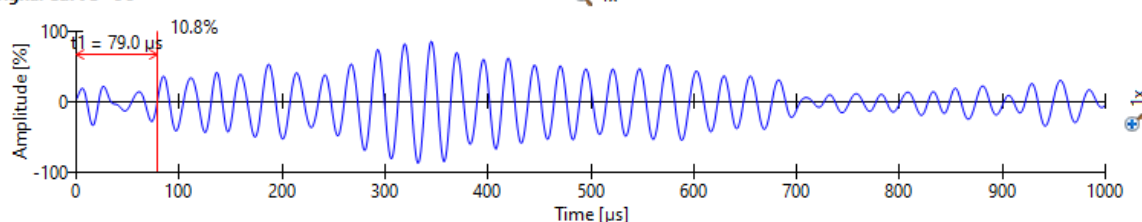


- Beton dengan lubang berisi air

A - Scan PTB\_B air (Beton dengan lubang arah transversal, 3 inch) 3 Pipa, bagian bawah

06/24/2021 12:35 PM

Signal Curve #98

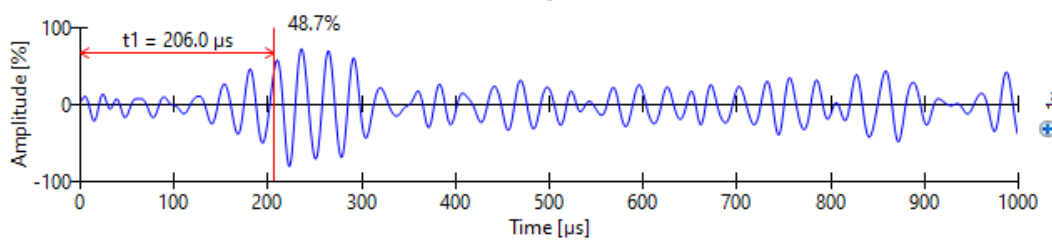


## PTC – Titik 11

– Beton dengan lubang tanpa air

A - Scan PTC\_B (Beton dengan lubang arah transversal, 4 inch) 3 Pipa, bagian bawah 06/08/2021 9:57 AM Area Scan

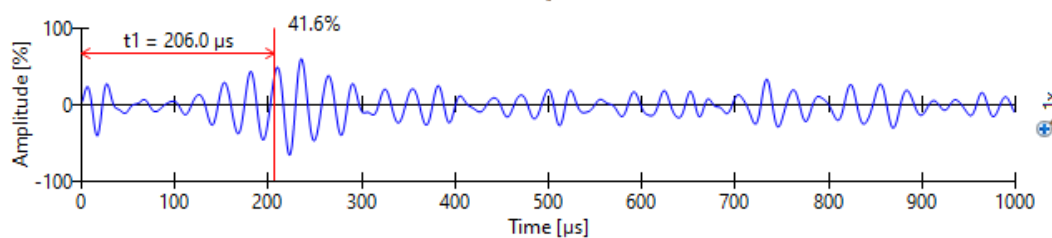
Signal Curve #11



– Beton dengan lubang berisi air

A - Scan PTC\_B air (Beton dengan lubang arah transversal, 4 inch) 3 Pipa, bagian bawah 06/25/2021 1:20 PM Area Scan

Signal Curve #11

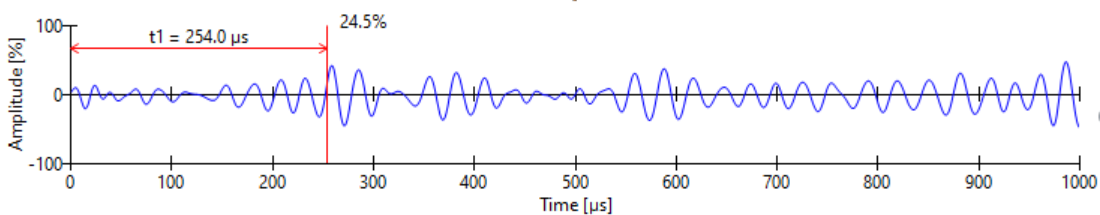


## PTC – Titik 137

– Beton dengan lubang tanpa air

A - Scan PTC\_B (Beton dengan lubang arah transversal, 4 inch) 3 Pipa, bagian bawah 06/08/2021 9:57 AM

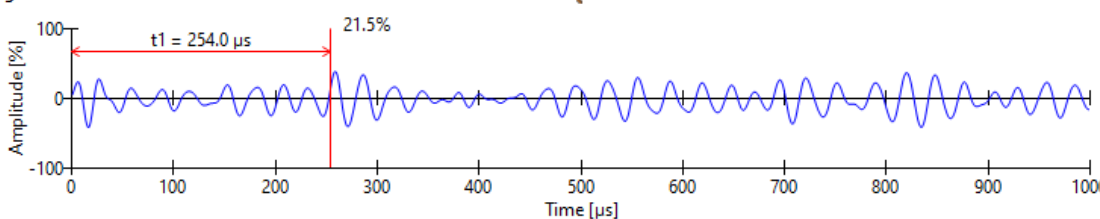
Signal Curve #137



– Beton dengan lubang berisi air

A - Scan PTC\_B air (Beton dengan lubang arah transversal, 4 inch) 3 Pipa, bagian bawah 06/25/2021 1:20 PM

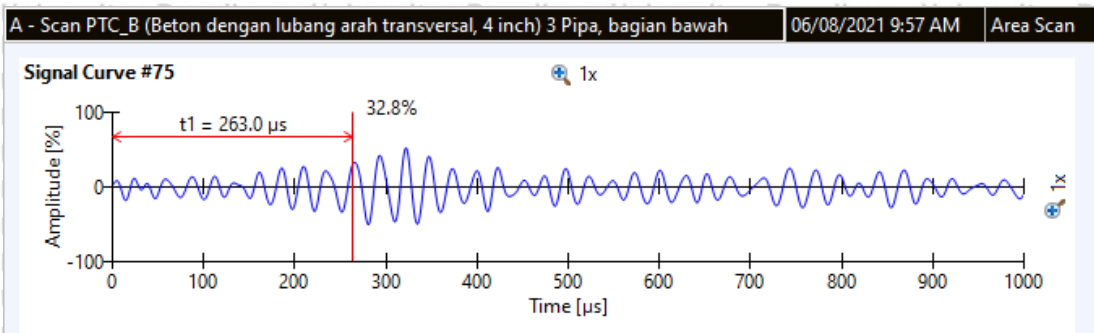
Signal Curve #137



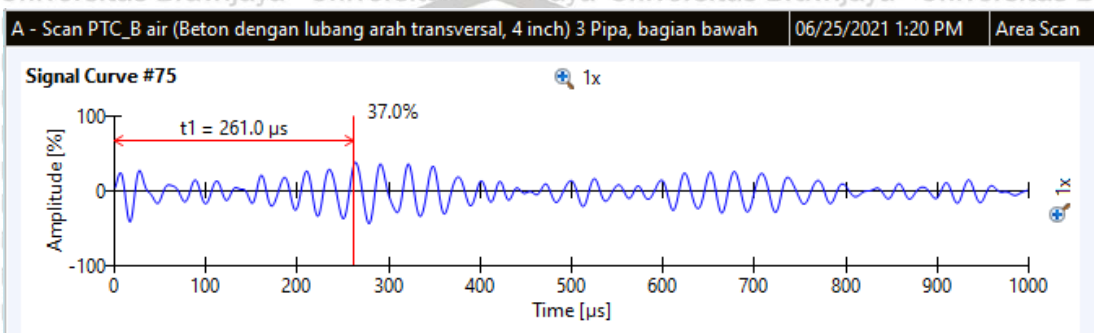


PTC – Titik 75

- Beton dengan lubang tanpa air

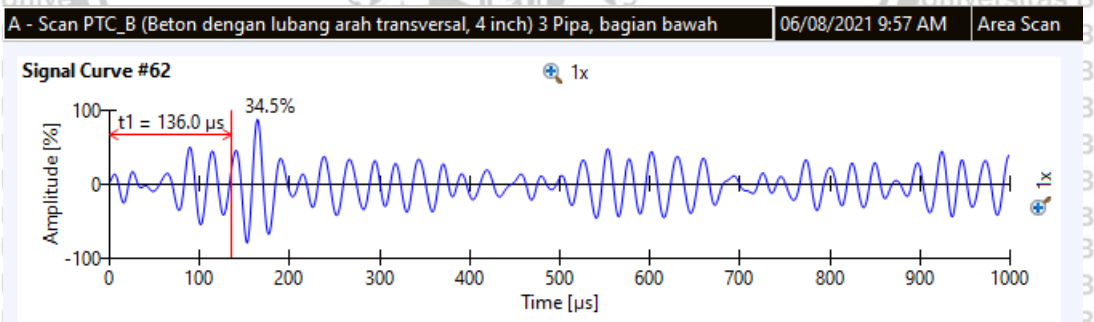


- Beton dengan lubang berisi air

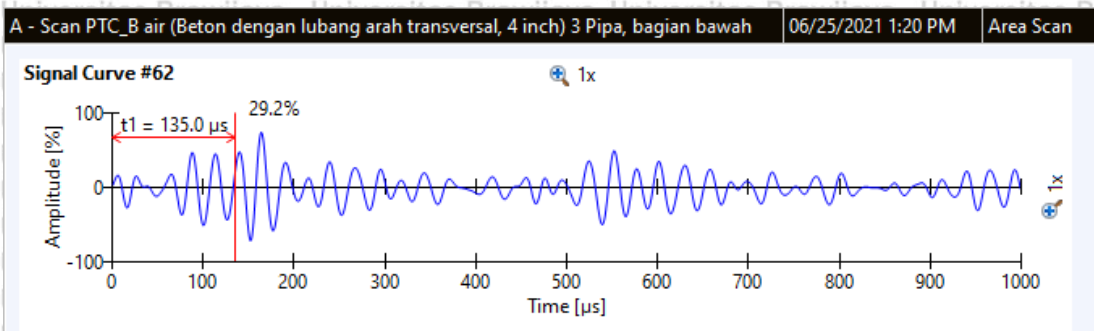


PTC – Titik 62

- Beton dengan lubang tanpa air

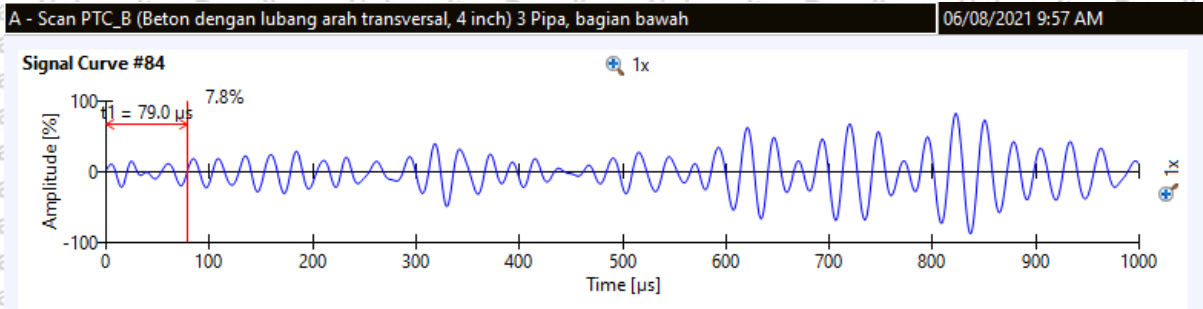


- Beton dengan lubang berisi air

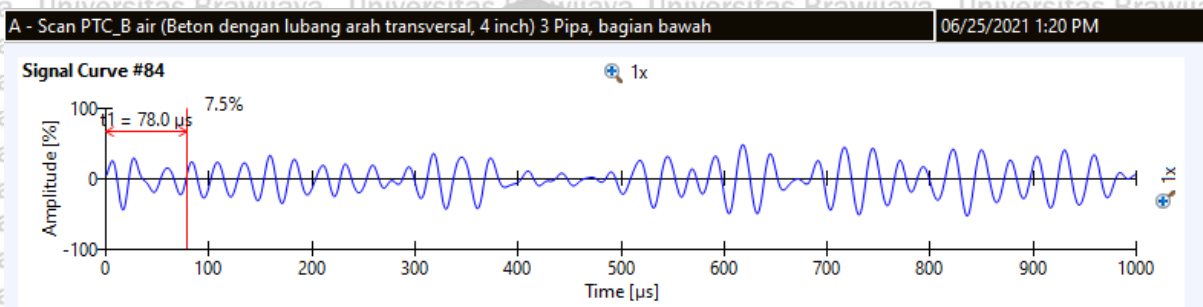


PTC – Titik 84

- Beton dengan lubang tanpa air

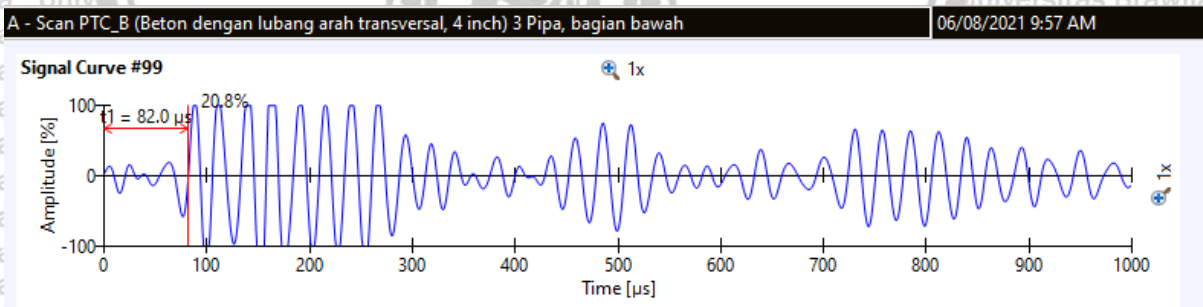


- Beton dengan lubang berisi air

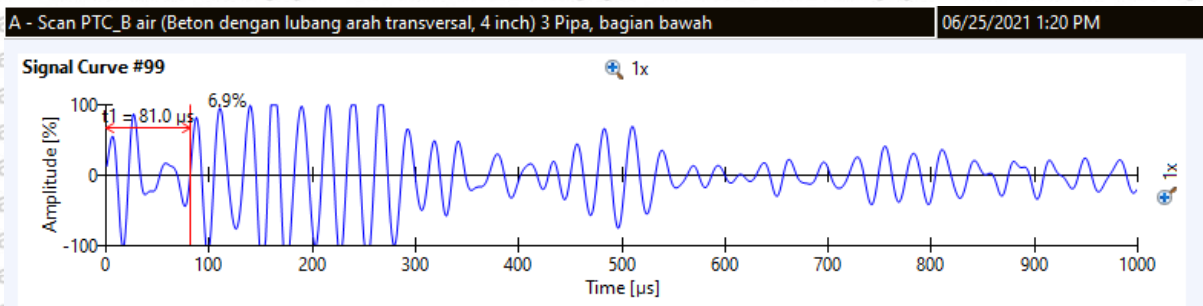


PTC – Titik 99

- Beton dengan lubang tanpa air



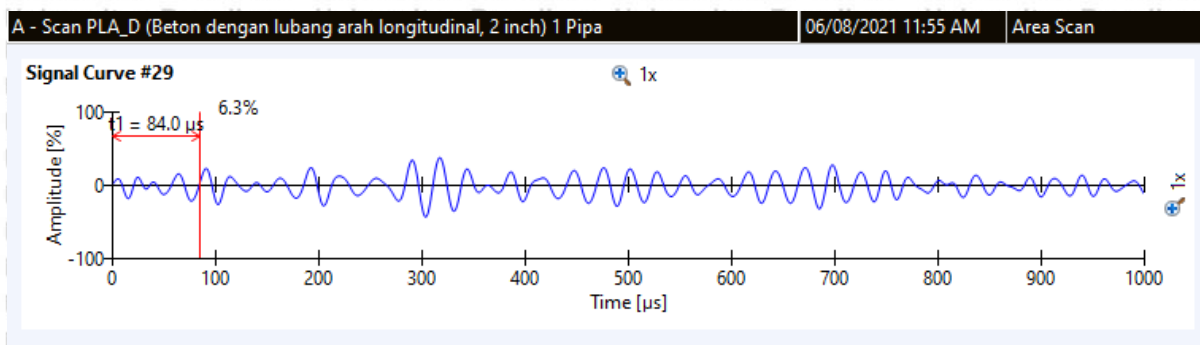
- Beton dengan lubang berisi air



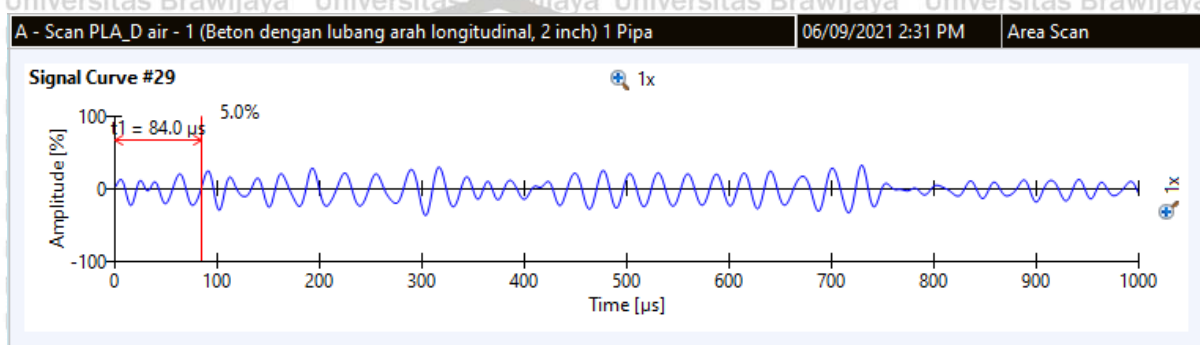


PLA – Titik 29

- Beton dengan lubang tanpa air

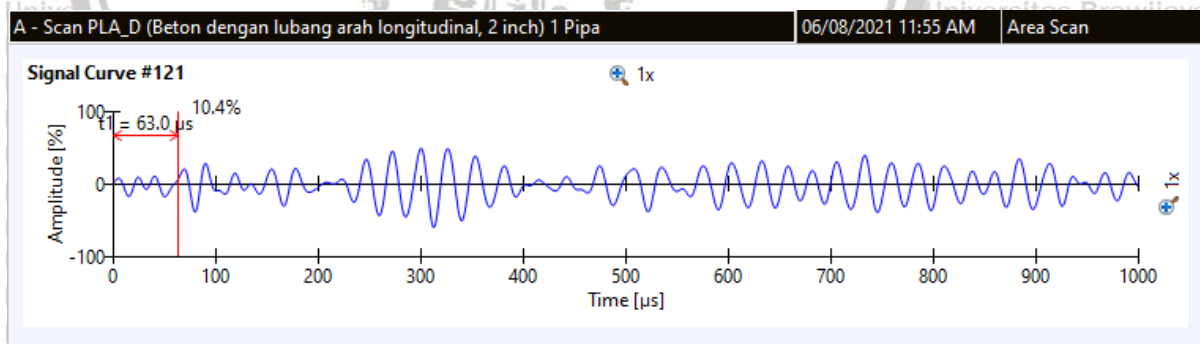


- Beton dengan lubang berisi air

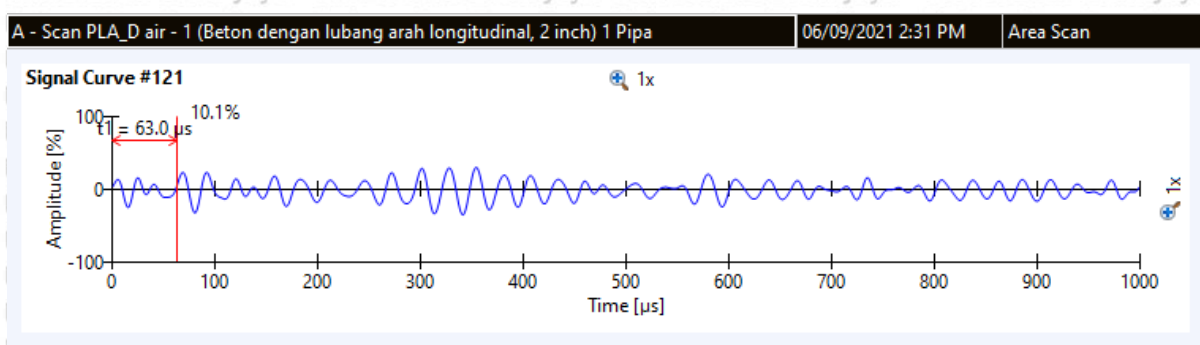


PLA – Titik 121

- Beton dengan lubang tanpa air

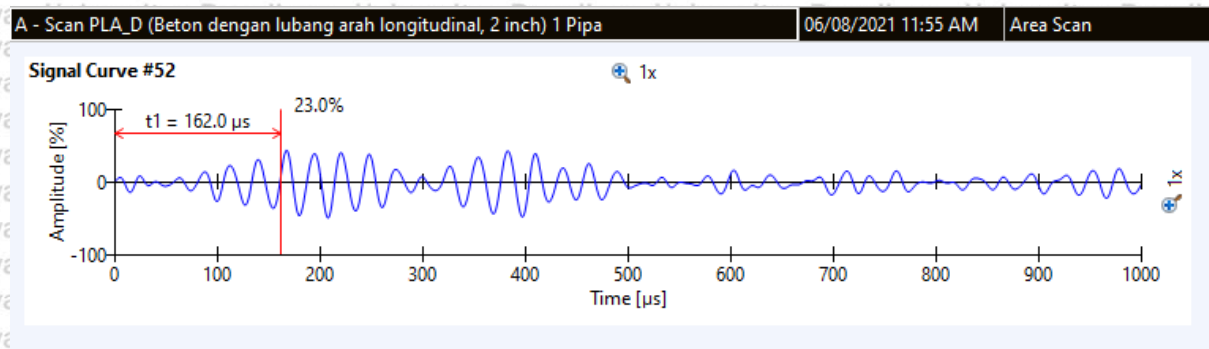


- Beton dengan lubang berisi air

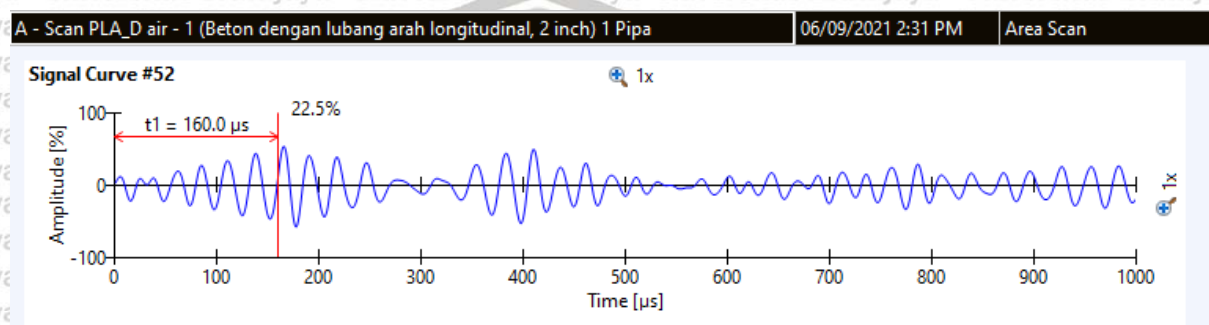


PLA – Titik 52

- Beton dengan lubang tanpa air

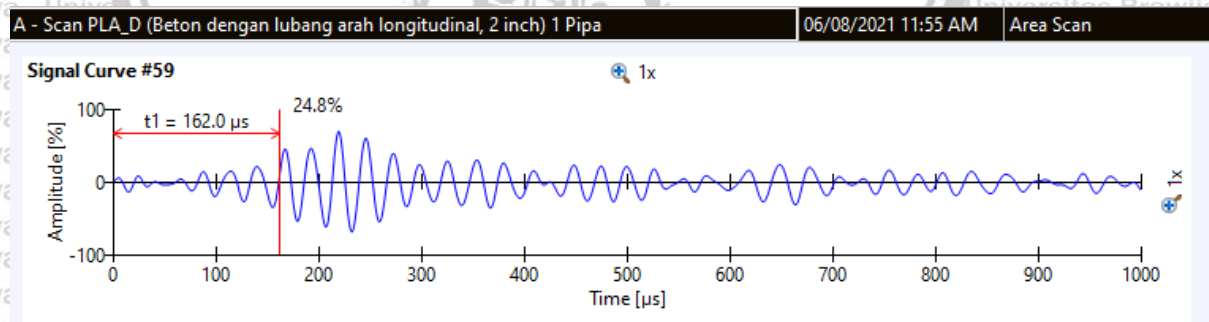


- Beton dengan lubang berisi air

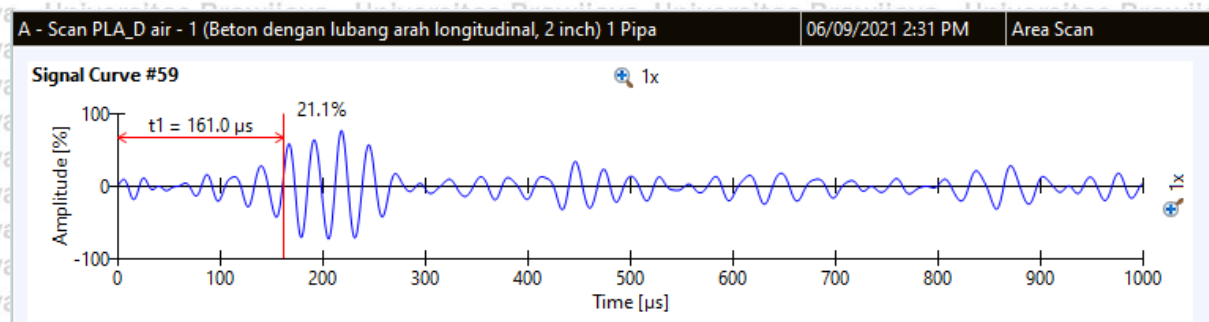


PLA – Titik 59

- Beton dengan lubang tanpa air



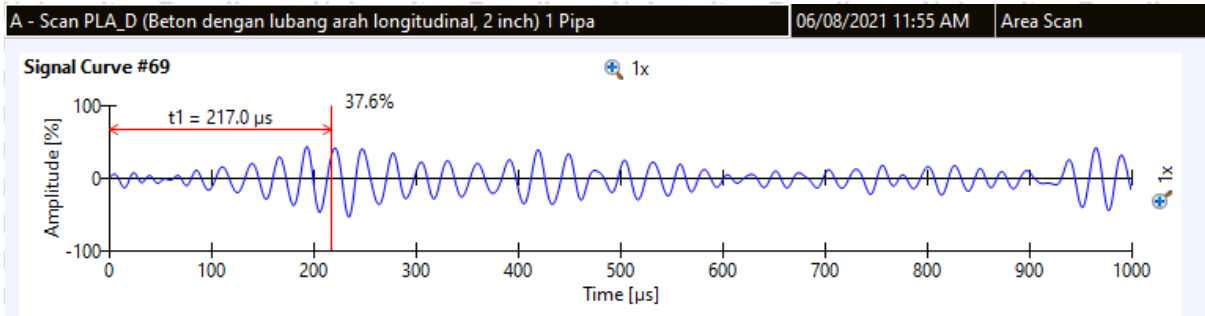
- Beton dengan lubang berisi air



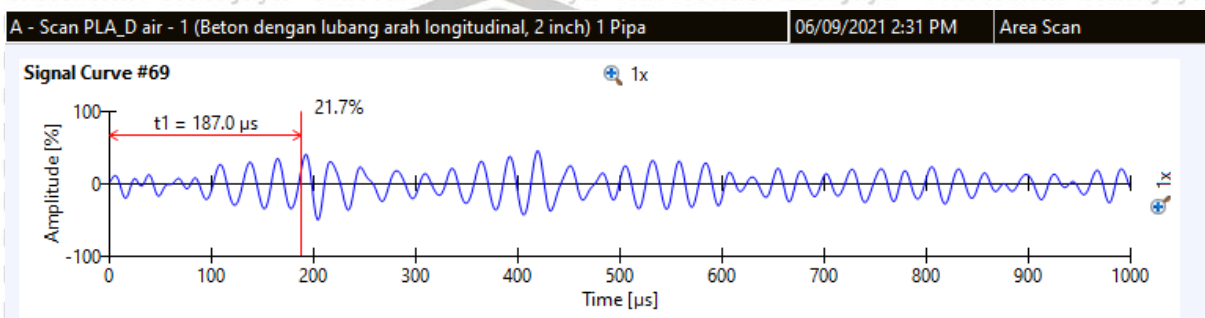


PLA – Titik 69

- Beton dengan lubang tanpa air

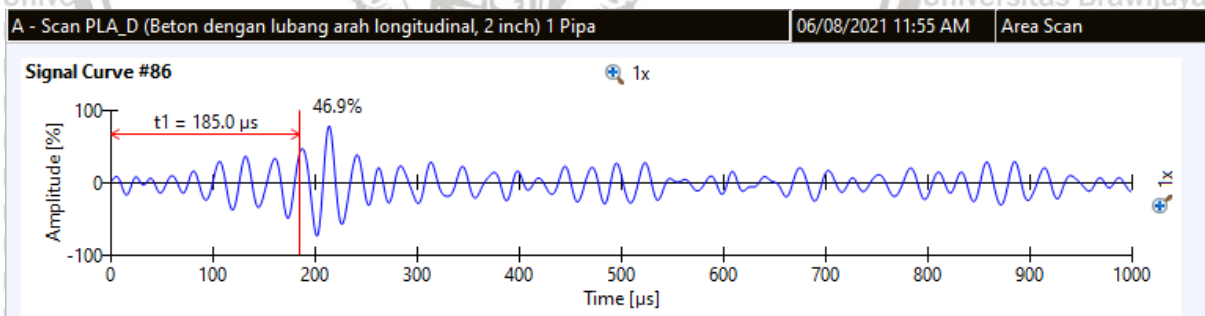


- Beton dengan lubang berisi air

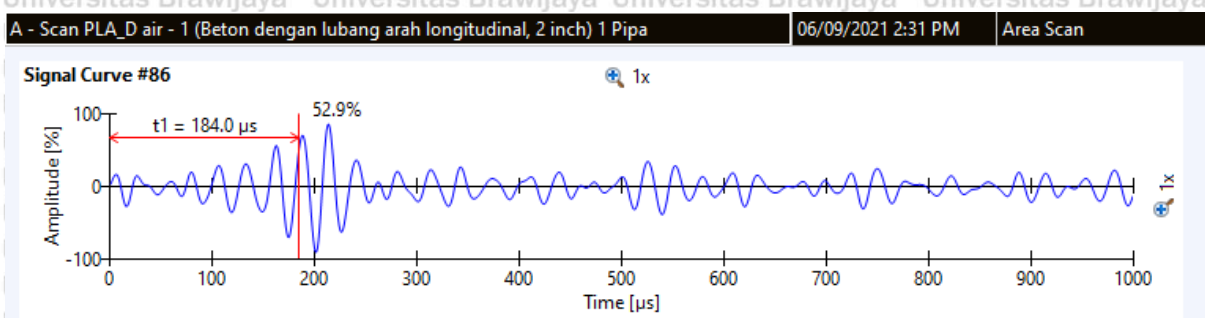


PLA – Titik 86

- Beton dengan lubang tanpa air

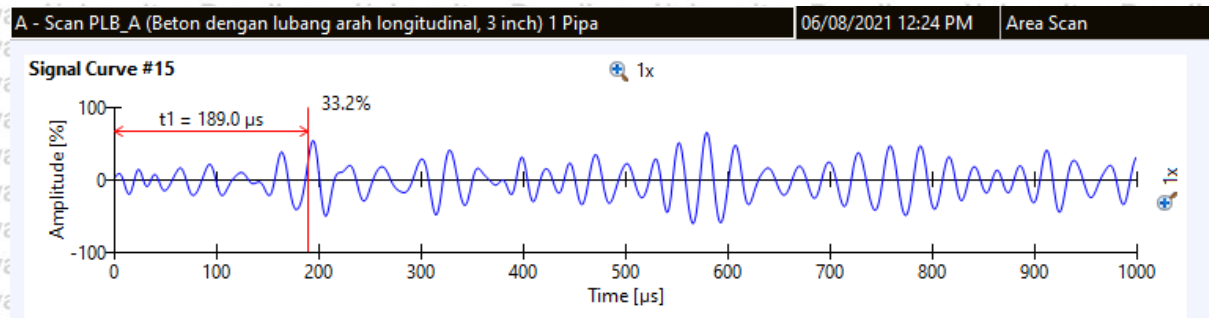


- Beton dengan lubang berisi air

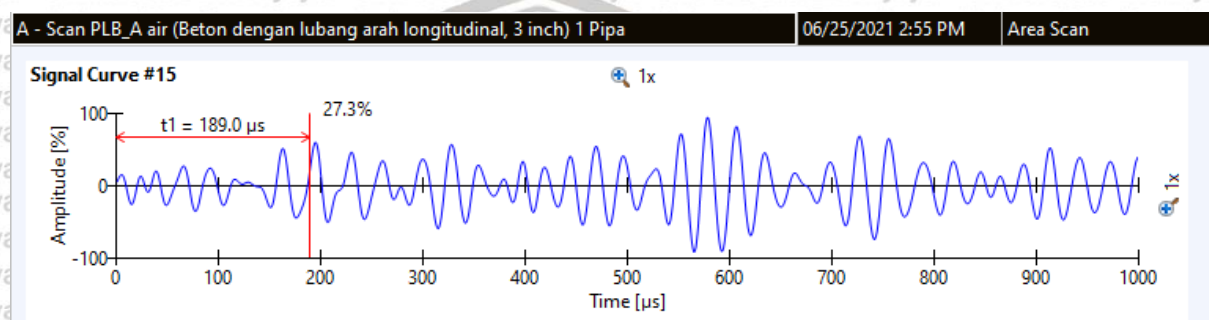


## PLB – Titik 15

- Beton dengan lubang tanpa air

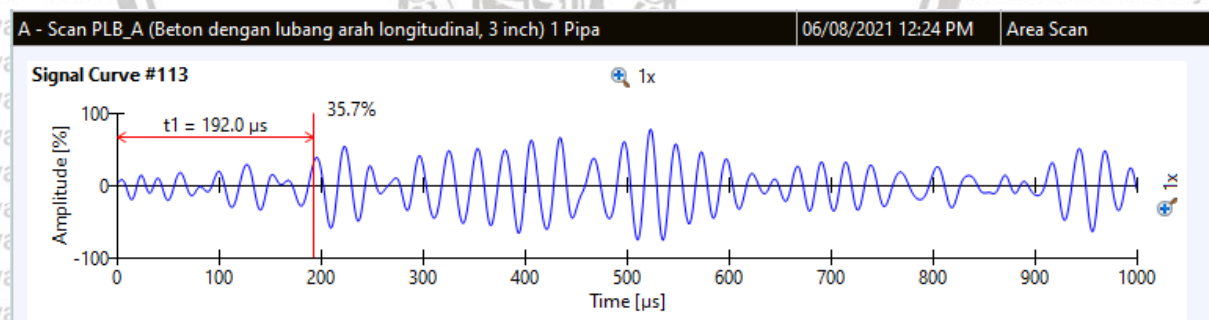


- Beton dengan lubang berisi air

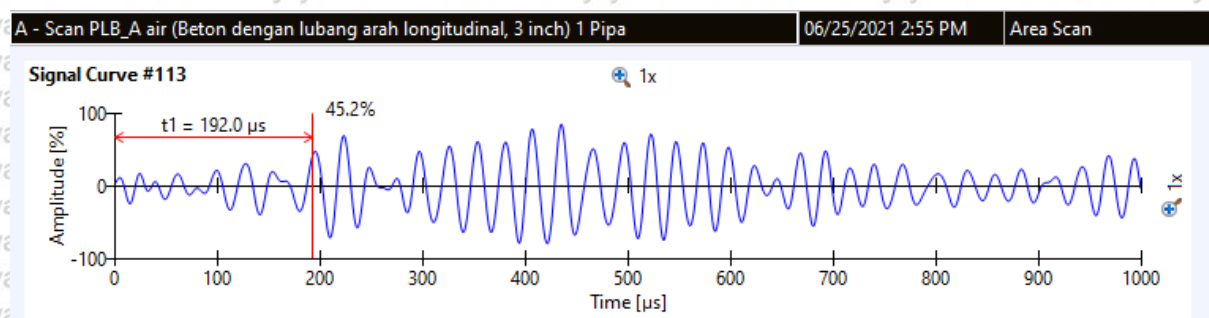


## PLB – Titik 113

- Beton dengan lubang tanpa air



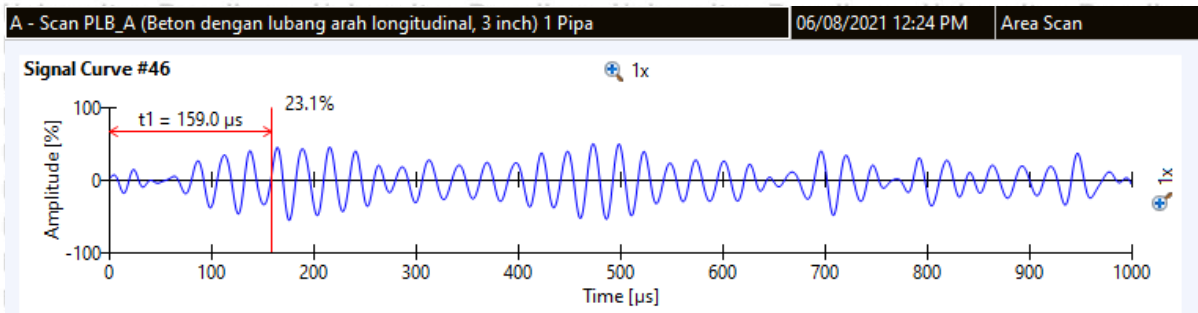
- Beton dengan lubang berisi air



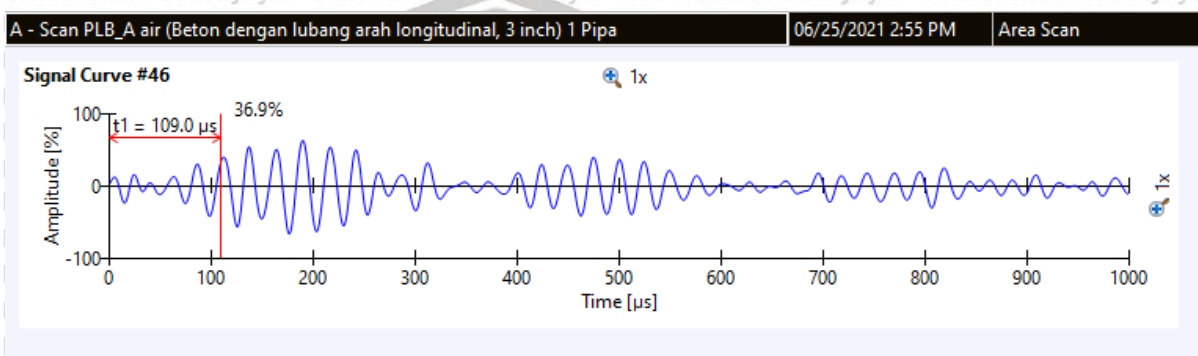


PLB – Titik 46

- Beton dengan lubang tanpa air

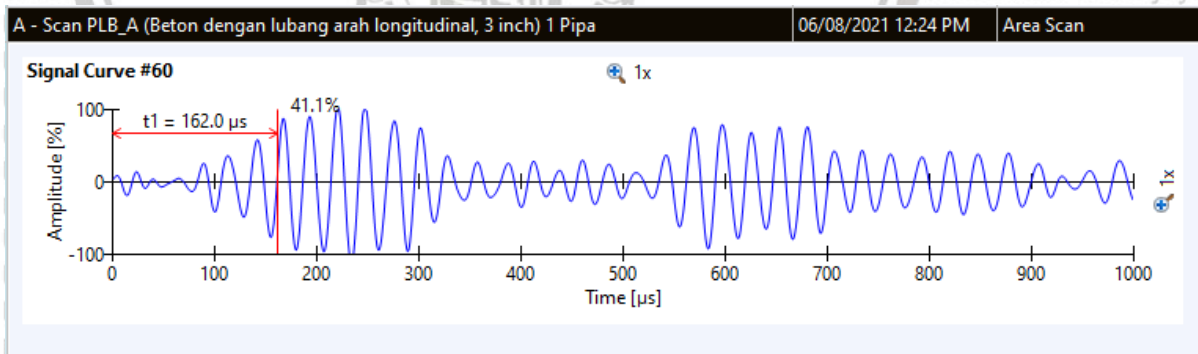


- Beton dengan lubang berisi air

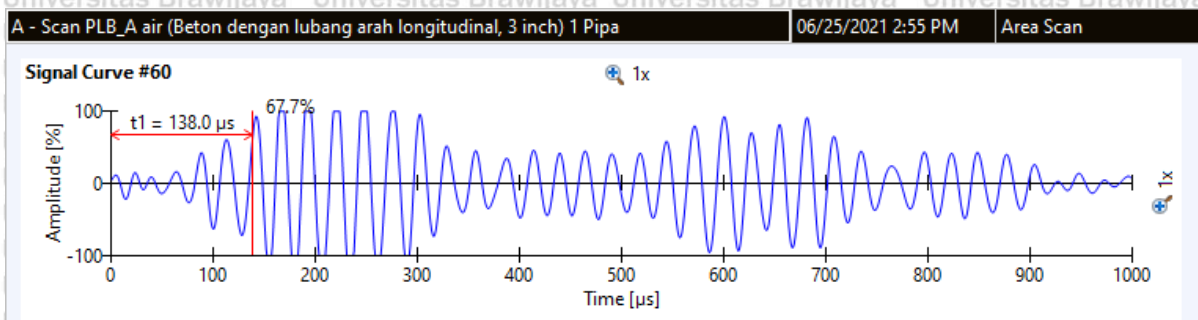


PLB – Titik 60

- Beton dengan lubang tanpa air

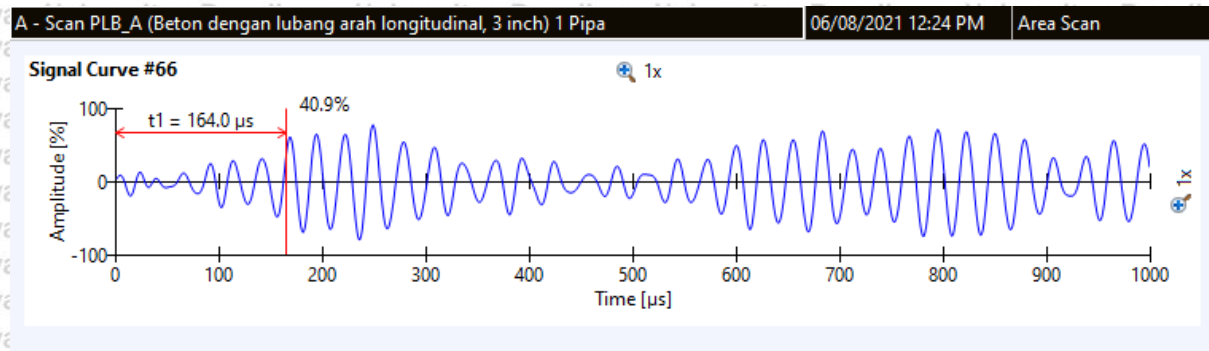


- Beton dengan lubang berisi air

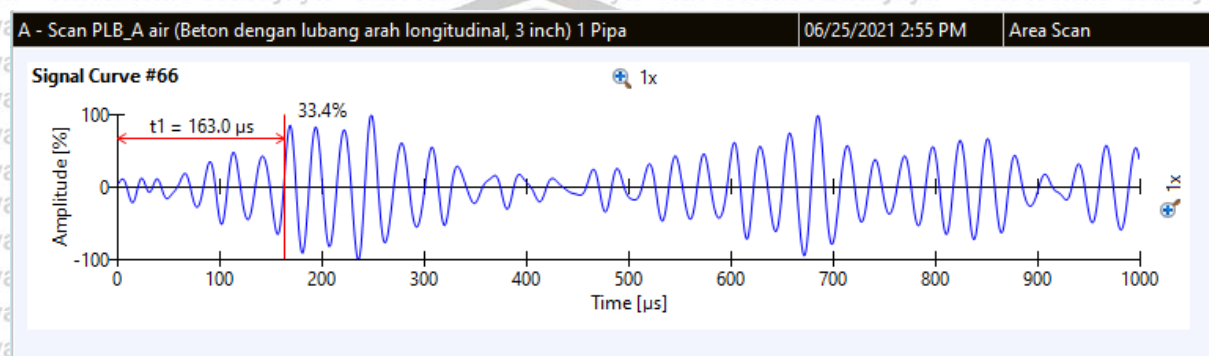


## PLB – Titik 66

- Beton dengan lubang tanpa air

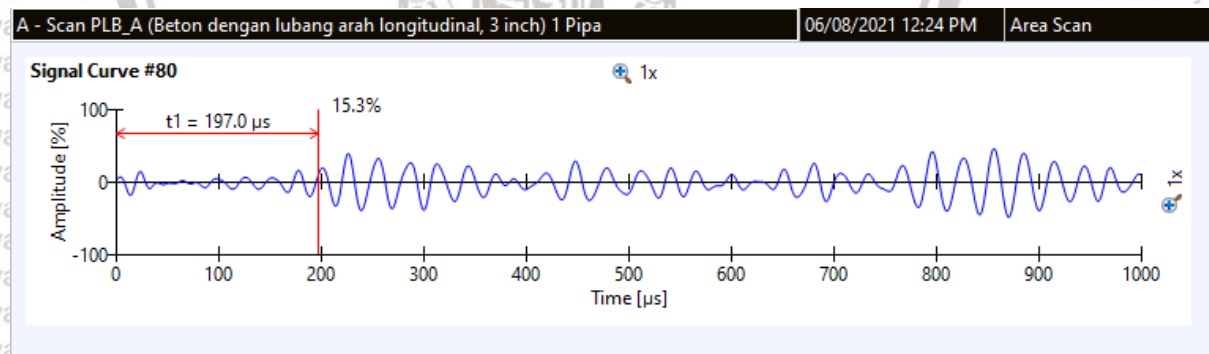


- Beton dengan lubang berisi air

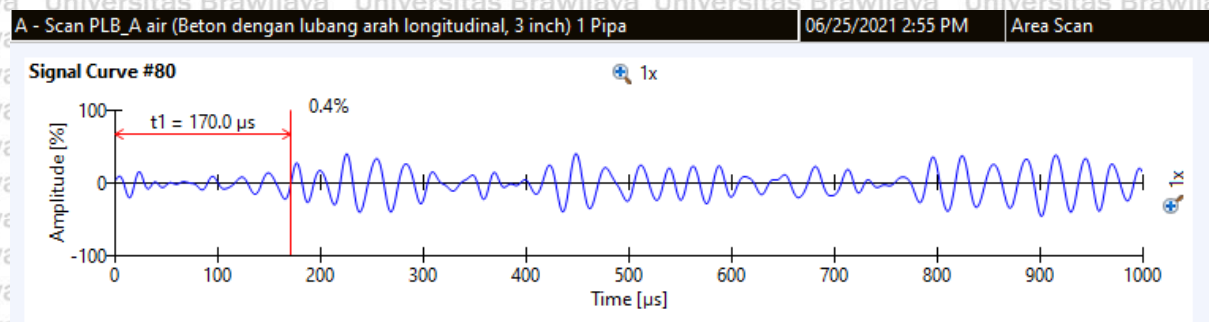


## PLB – Titik 80

- Beton dengan lubang tanpa air



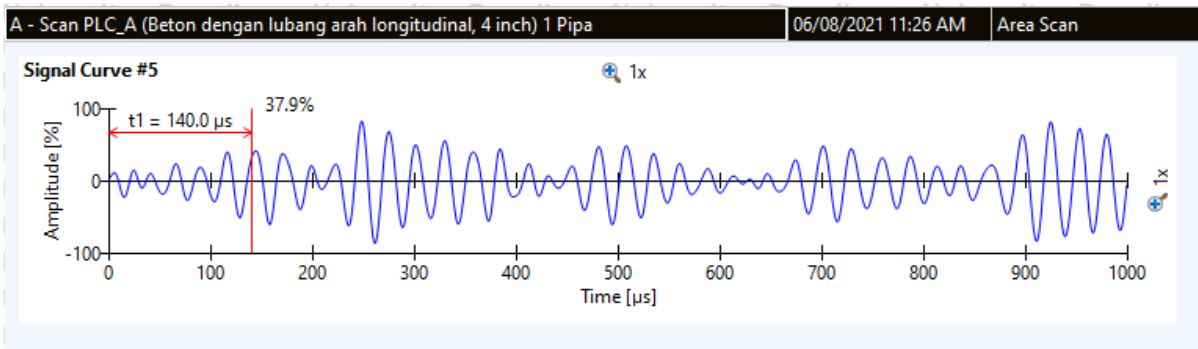
- Beton dengan lubang berisi air



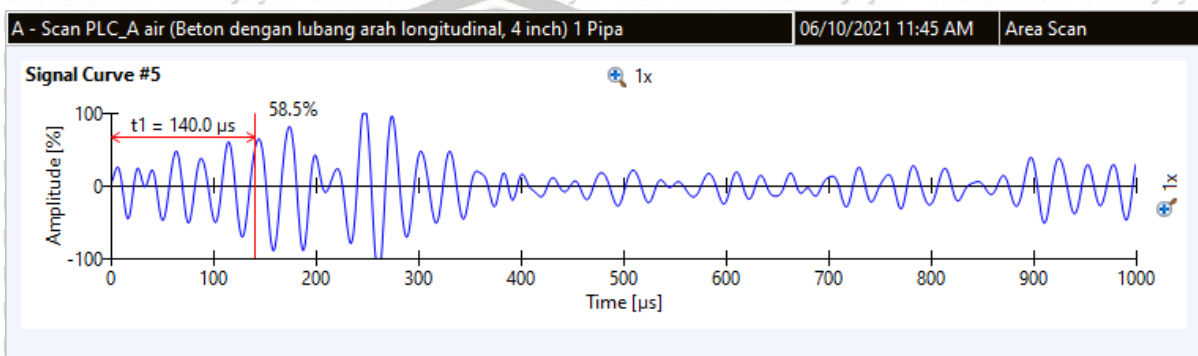


PLC – Titik 5

- Beton dengan lubang tanpa air

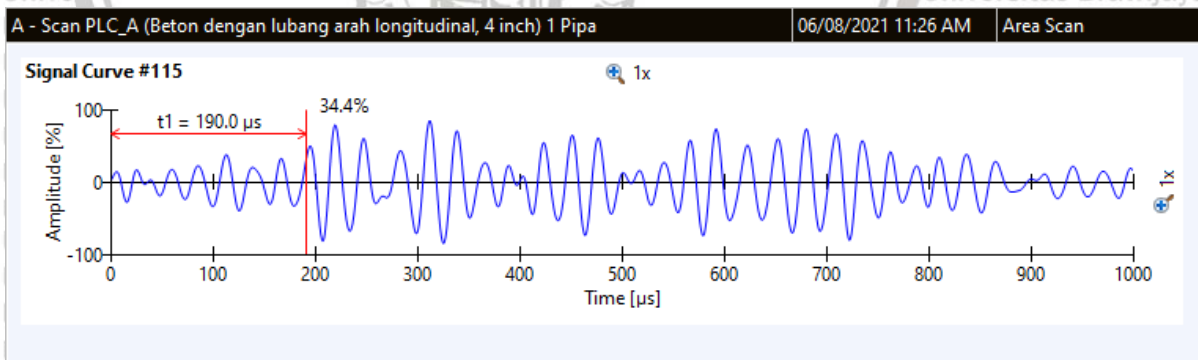


- Beton dengan lubang berisi air

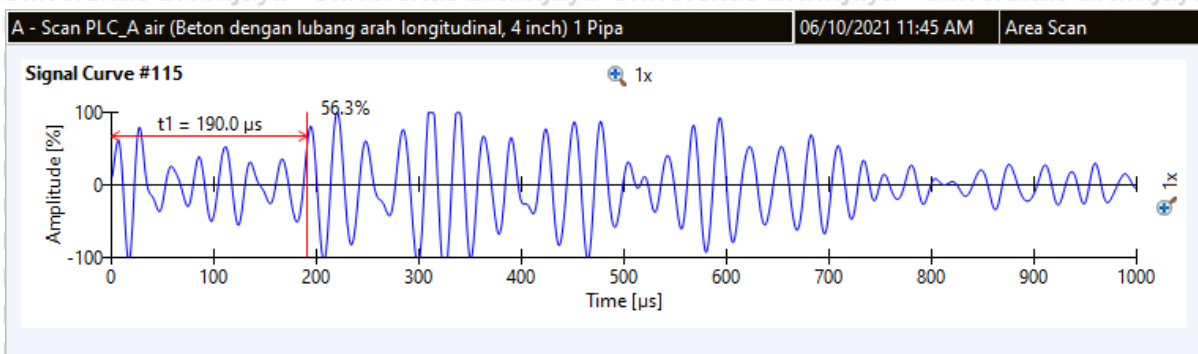


PLC – Titik 115

- Beton dengan lubang tanpa air

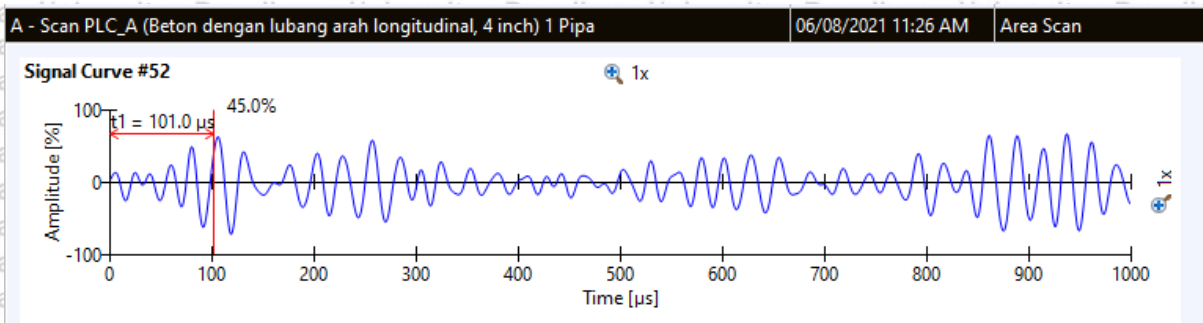


- Beton dengan lubang berisi air

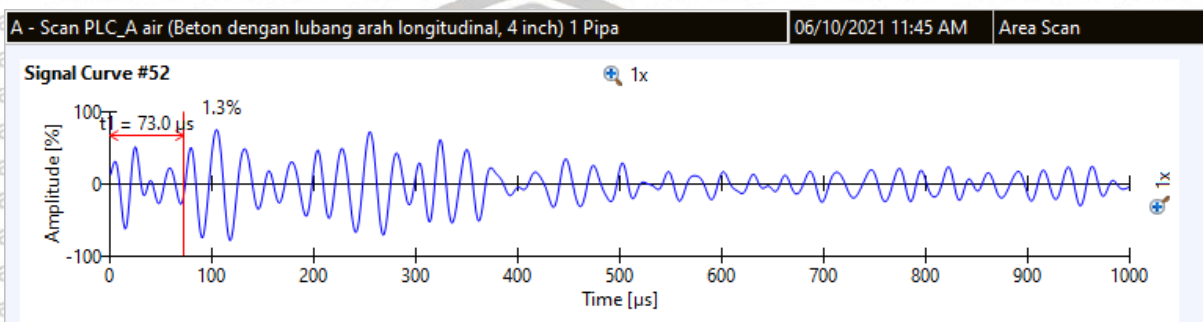


## PLC – Titik 52

- Beton dengan lubang tanpa air

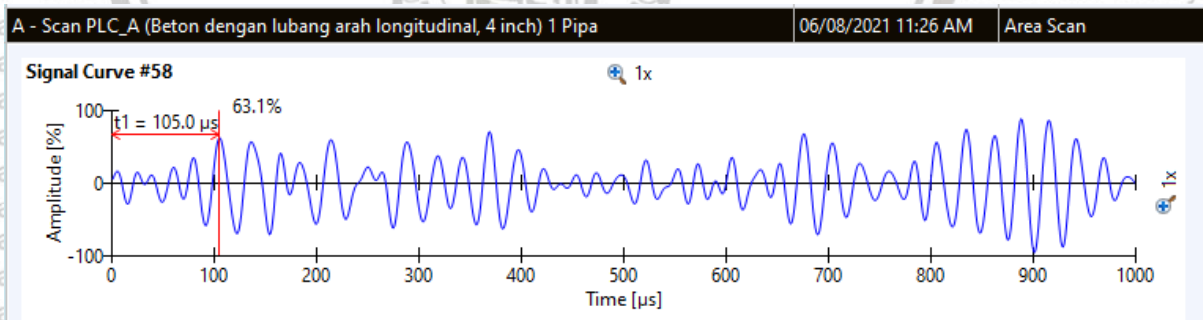


- Beton dengan lubang berisi air

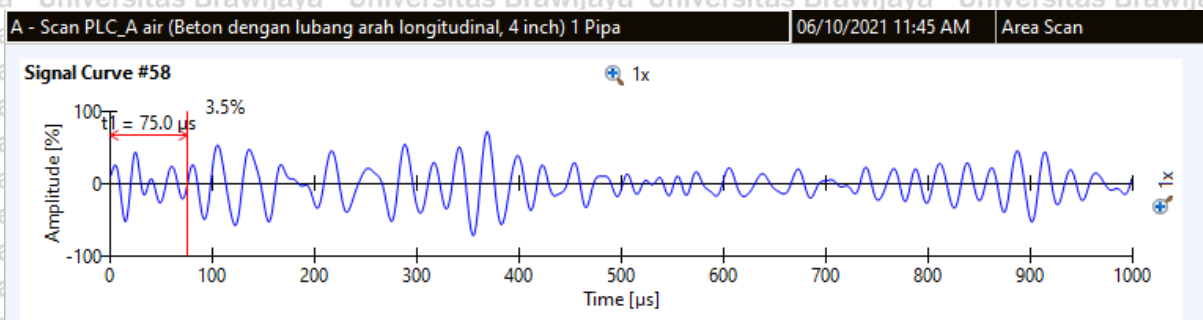


## PLC – Titik 58

- Beton dengan lubang tanpa air



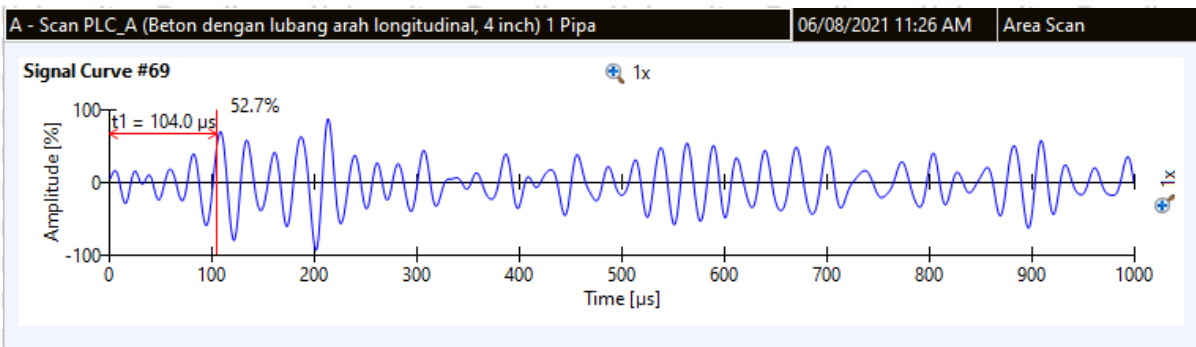
- Beton dengan lubang berisi air



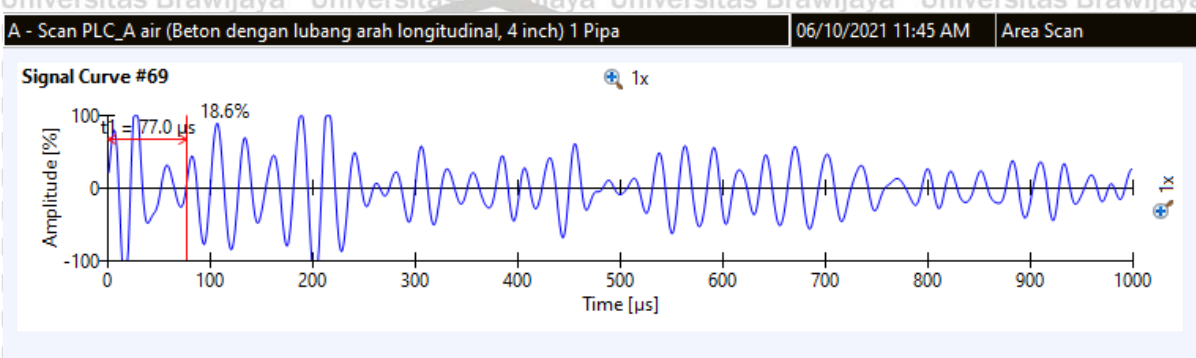


## PLC – Titik 69

- Beton dengan lubang tanpa air

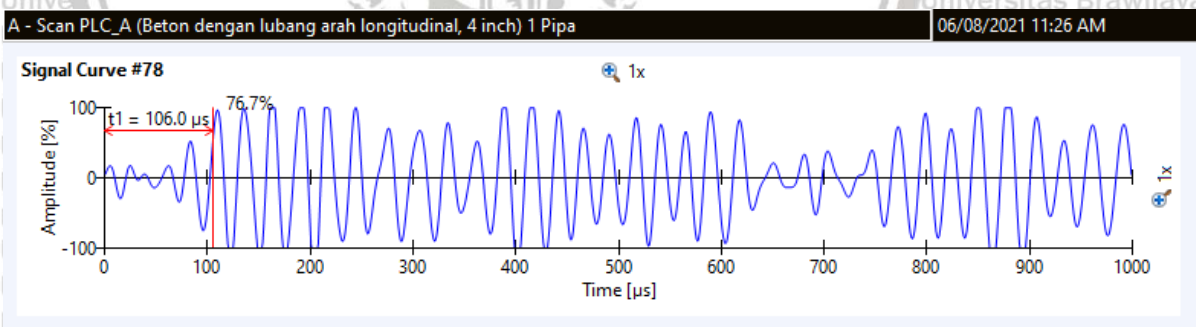


- Beton dengan lubang berisi air

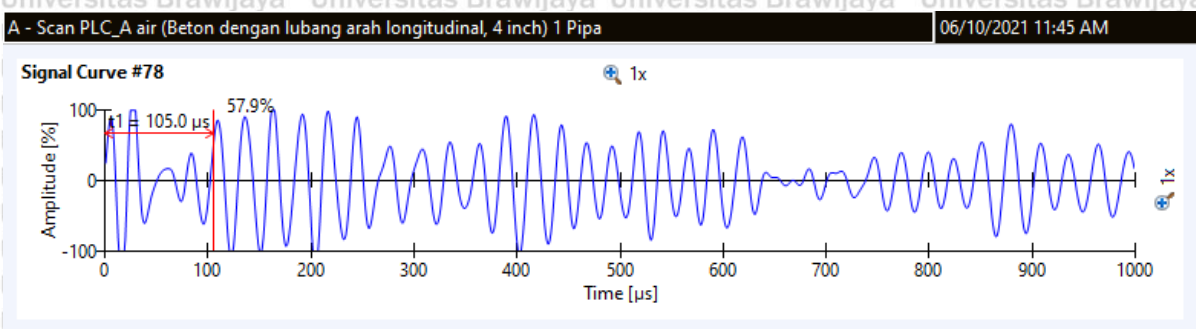


## PLC – Titik 78

- Beton dengan lubang tanpa air



- Beton dengan lubang berisi air



(Halaman sengaja dikosongkan)

